

**ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL ENSAYO DE
FLEXIÓN EN TRES PUNTOS DE PERFILES DE SECCIÓN CERRADA**

CRISTIAN FELIPE FIGUEROA SERNA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2017

**ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL ENSAYO DE
FLEXIÓN EN TRES PUNTOS DE PERFILES DE SECCIÓN CERRADA**

CRISTIAN FELIPE FIGUEROA SERNA

1.088.023.044

Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico.

DIRECTOR

CARLOS ANDRÉS MESA MONTOYA

M.Sc.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2017

DEDICATORIA

Gracias a mis padres, a la Universidad Tecnológica de Pereira, a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UTP, a todos los que me ayudaron para la culminación de este proyecto y por el apoyo recibido durante mi formación académica.

Gracias.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	3
CAPITULO 1	10
INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	11
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	11
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	12
CAPITULO 2	14
ASPECTOS TÉCNICOS.....	14
2.1 ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE EL ENSAYO DEL FLEXIÓN A TRES PUNTOS.....	14
2.1.1 ASTM (International Organization for Standardization).....	14
2.1.2 ISO (International Organization for Standardization)	15
2.1.3 NTC (Norma Técnica Colombiana).....	16
2.1.4 OTRAS NORMAS.....	17
2.2 SELECCIÓN.....	17
2.3 REFERENCIAS.....	22
CAPITULO 3	23
CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE PRUEBA.....	23
3.1 INTRODUCCIÓN.....	23
3.2 GEOMETRIA.....	23
3.3 MATERIAL.....	23
3.4 DISPONIBILIDAD REGIONAL.....	26
3.5 ESQUEMA DE LA GEOMETRÍA.....	26
3.6 REFERENCIAS.....	29

CAPITULO 4	30
CONDICIONES DE FRONTERA	30
4.1 INTRODUCCIÓN	30
4.2 SISTEMA DE ANÁLISIS	30
4.3 GEOMETRIA	30
4.4 MATERIAL	33
4.5 CONSIDERACIONES DE MALLADO	36
4.6 CONFIGURACIÓN DE CONTACTOS	38
4.7 DESPLAZAMIENTO DEL PUNZÓN	40
4.8 CONFIGURACIÓN SISTEMA DE ANÁLISIS EXPLICIT DYNAMICS	41
4.9 REFERENCIAS	47
CAPITULO 5	48
RESULTADOS	48
5.1 INTRODUCCIÓN	48
5.2 ESFUERZO NORMAL	48
5.3 FUERZA DEL CABEZAL	51
5.4 ANGULO DE DEFORMACIÓN Y DEFORMACIÓN DIRECCIONAL	53
5.5 MOMENTO FLECTOR MÁXIMO	56
CAPITULO 6	72
CONCLUSIONES , RECOMENDACIONES y APORTES	72
6.1 CONCLUSIONES	72
6.2 RECOMENDACIONES	72
6.3 APORTES	73
6.4 REFERENCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Montaje Prueba de flexión estática (ASTM D 143-14 y ASTM D3043).....	18
Figura 2.2 Esquema de la Norma ASTM E290-14.....	19
Figura 3.1 Medidas longitudinales básicas correspondientes al perfil estructural a utilizar en el montaje del ensayo de flexión.....	27
Figura 3.2 Medidas Transversales básicas correspondientes al perfil estructural a utilizar en el montaje del ensayo de flexión.....	27
Figura 4.1 Geometría del perfil estructural 40x40 Cl 14 tomado como ejemplo.....	32
Figura 4.2 Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria plástica para el Acero A36.....	33
Figura 4.3 Configuración del material para los diferentes cuerpos pertenecientes a la Geometría de la simulación.....	35
Figura 4.4 Mallado de las tres secciones que conforman el componente del perfil 40x40 Cl12.....	36
Figura 4.5 Grafica de Independencia de malla basado en el espécimen 40x40 CL 12.....	38
Figura 4.6 Configuración de los contactos de tipo Joint entre los apoyos, el cabezal y el perfil.....	39
Figura 4.7 Configuración de los contactos entre los apoyos, el cabezal y el perfil.....	40
Figura 4.8 Aumento del Joint Displacement durante de la simulación.....	41
Figura 4.9 Sistema de Análisis Explicit Dynamics.....	42
Figura 4.10 Configuración general en el sistema de Análisis Éxplicit Dynamics.....	44
Figura 5.1 Esfuerzo Normal Presente en todo el perfil estructural 40x40 Cl12.....	48
Figura 5.2 Esfuerzo Normal presente en la superficie inferior del perfil estructural 40x40 Cl12.....	49
Figura 5.3 Ángulo de deformación generado en la superficie inferior del perfil estructural 40x40 Cl12.....	54
Figura 5.4 Solicitación de carga del perfil estructural 40x40 Cl 12.....	56
Figura 5.5 Diagrama de Cizalladura para el perfil estructural 40x40 Cl 12.....	57
Figura 5.6 Diagrama de Momento Flector para el perfil estructural 40x40 Cl 12.....	57
Figura 5.7 Momento Flector - Deformación Angular perfil estructural 40X40 CL12.....	61

Figura 5.8 Momento Flector - Deformación Angular perfil estructural 40X40 CL14.....	62
Figura 5.9 Momento Flector - Deformación Angular perfil estructural 50X50 CL12.....	64
Figura 5.10 Momento Flector - Deformación Angular perfil estructural 50X50 CL14.....	65
Figura 5.11 Momento Flector - Deformación Angular perfil estructural 60X40 CL12.....	66
Figura 5.12 Momento Flector - Deformación Angular perfil estructural 60X40 CL14.....	67
Figura 5.13 Momento Flector- Deformación Angular Simulada y Teórica.....	69
Figura 5.14 Momento Flector - Deformación Angular de todos los Perfil Estructurales.....	70
Figura 5.15 Densidad de Energía de deformación absorbida por cada perfil estructural.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla # 2.1 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material para el ente de estandarización ASTM.....	15
Tabla # 2.2 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material para el ente de estandarización ISO.....	16
Tabla # 2.3 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material para el ente de estandarización NTC.....	16
Tabla # 2.4 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material.....	17
Tabla # 2.5 Comparación de normas ASTM para el ensayo de flexión de tres puntos.....	20
Tabla # 3.1 Perfiles más utilizados regionalmente.....	23
Tabla # 3.2 Propiedades mecánicas correspondientes al Acero A36.....	24
Tabla # 3.3 Valores de Esfuerzo y Deformación Unitaria correspondientes a la zona plástica para el Acero A36.....	25
Tabla # 3.4 Dimensiones de los perfiles estructurales a utilizar en el ensayo de flexión de tres puntos.....	26
Tabla # 4.1 Propiedades utilizadas para crear el modelo de un Acero A36 en el software ANSYS.....	34
Tabla # 4.2 Datos calculados mediante la simulación para realizar la Independencia de malla del espécimen 40x40 CL12.....	37
Tabla # 4.3 Propiedades utilizadas para crear el modelo de un Acero A36 en el sistema de análisis Explicit Dynamics.....	42
Tabla # 4.4 Configuración usada en el Análisis Settings usada en el sistema Éxplicits Dynamics.....	45
Tabla # 4.5 Configuración de erosión usada en el análisis settings, en el sistema explicits dynamics.....	46
Tabla # 4.6 Configuración del desplazamiento del cabezal.....	46
Tabla # 5.1 Resultados del Esfuerzo normal en la cara Inferior del perfil estructural 40x40 CL12.....	50
Tabla # 5.2 Resultados de la fuerza ejercida por el cabezal.....	51

Tabla # 5.3 Resultados del ángulo de deformación y la deformación direccional de la cara inferior del perfil estructural 40x40 CL12.....	54
Tabla # 5.4 Resultados del cálculo de reacciones y Momento flector presentes en el perfil estructural 40x40 CL12.....	58
Tabla # 5.5 Densidad de Energía de deformación perfil estructural 40x40 CL12.....	62
Tabla # 5.6 Densidad de Energía de deformación perfil estructural 40x40 CL14.....	63
Tabla # 5.7 Densidad de Energía de deformación perfil estructural 50x50 CL12.....	64
Tabla # 5.8 Densidad de Energía de deformación perfil estructural 50x50 CL14.....	66
Tabla # 5.9 Densidad de Energía de deformación perfil estructural 60x40 CL12.....	67
Tabla # 5.10 Densidad de Energía de deformación perfil estructural 60x40 CL14.....	68
Tabla # 5.11 Resumen de Resultados.....	69

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El Reglamento N ° 66 habla sobre la normatividad que existe para la aprobación y homologación de las superestructuras de buses con miras a poner en funcionamiento para el servicio público, en donde uno de los criterios principales es que, dado el caso en que suceda un accidente, dicha superestructura pueda estar en capacidad de absorber gran parte de la energía del impacto al deformándose; procurando proteger al máximo a sus pasajeros sin invadir lo que aquí se llamará “Zona de supervivencia”, espacio en el cual los pasajeros están seguros. La deformación que experimentará la superestructura puede llegar a provocar un colapso en algunas secciones de la estructura, en el momento en que perfiles estructurales que lo conforman no estén en la capacidad de absorber más energía de deformación, producto del incremento de las solicitaciones de cargas flectoras a un nivel superior al que puedan soportar los perfiles estructurales.

Por lo tanto es necesario al momento de construir una superestructura definir las cargas flectoras máximas que pueden soportar los perfiles, la forma experimental para definir estas cargas es mediante el ensayo de flexión de tres puntos. Esta prueba física conlleva elevados costos ya que es una prueba de tipo destructiva, debido a que para validar los diferentes perfiles que son utilizados en una superestructura se debe realizar un ensayo de flexión por cada tipo de espécimen, añadiendo también el costo generado por las modificaciones que se deban aplicar a la máquina de ensayo universal en cada toma de datos. A su vez que en un ensayo físico real no se puede observar cómo se desarrollaron los esfuerzos generados por las solicitaciones de carga a lo largo de los perfiles estructurales.

De acuerdo a lo anterior es necesario establecer una metodología basada en simulaciones para poder determinar de manera preliminar los momentos máximos que van a poder soportar

los perfiles de la superestructura con el fin de que no alcance el punto de colapso y que almacene la mayor energía de deformación posible.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la realización de este proyecto se pretende encontrar el momento flector máximo que soportaran los perfiles estructurales (40x40, 50x50 y 60x40) en calibres 12 y 14 por medio del ensayo de flexión de tres puntos según las normas ASTM D143-14, D3043 y E290-14; Para obtener estos momentos máximos, se utilizará el software ANSYS por medio de simulaciones computacionales en las cuales se deben establecer algunas condiciones de frontera y parámetros entre los cuales están: las propiedades mecánicas del material, la geometría de los perfiles, el movimiento del cabezal de fuerza, la fricción, entre otras configuraciones.

Se espera que con el estudio se puedan determinar de manera cuantitativa los momentos flectores máximos para los diferentes perfiles de sección cerrada, esto será el insumo para futuros estudios relacionados con superestructuras utilizadas en la construcción de buses de servicio público.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar por medio de simulación computacional el ensayo de flexión en tres puntos en perfiles de sección cerrada, de acuerdo a lo establecido en las normas ASTM D 143-14, D3043 y E 290-14.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los criterios y condiciones del ensayo de flexión de tres puntos, de acuerdo con las normas ASTM D 143-14, D3043 y E 290-14.
- Realizar la caracterización del espécimen para el perfil de sección cerrada, de acuerdo a la disponibilidad en el sector comercial y productivo.

- Definir un procedimiento para la aplicación de la simulación computacional, donde se establezcan los parámetros dimensionales necesarios y se definan las condiciones de frontera para el modelo.
- Simular la topología de interés, validando los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en la norma ASTM (Carga máxima soportar, Angulo de deformación, Momento flector máximo. esfuerzo norma máximo).

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El capítulo 1, contiene una introducción al tema a desarrollar, donde se acentúan las bases del proyecto y se da claridad sobre los objetivos de la realización del mismo.

En el capítulo 2, se realiza una revisión bibliográfica de los entes normalizadores, los cuales dan las pautas para la realización de diferentes ensayos mecánicos, entre otros aspectos técnicos relevantes industrialmente, entre los cuales podemos encontrar la ASTM (American Society for Testing and Materials), ISO (International Organization for Standardization), NTC (Norma Técnica Colombiana) entre otras y se seleccionaran las normas a aplicar en este proyecto.

El capítulo 3, se definirán las diferentes probetas a analizar; se tomará en cuenta su geometría, el tipo de material, propiedades mecánicas, la disponibilidad en el mercado regional, entre otros aspectos técnicos.

Durante el capítulo 4, se tratarán temas pertinentes a todas las consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta al momento de modelar el ensayo de flexión de tres puntos mediante el software ANSYS. Se definirán aspectos como la geometría, el mallado, los modelos propuestos para el material, la configuración de los contactos y las restricciones para el análisis estructural.

Finalizando en el capítulo 5, se analizarán e interpretarán los resultados obtenidos mediante la simulación, siendo objeto de análisis la deformación máxima que presentará el espécimen, así como el esfuerzo máximo, el momento flector máximo y el ángulo de deformación. Se harán las conclusiones, recomendaciones y aportes que dejen la realización de este proyecto.

CAPITULO 2

ASPECTOS TÉCNICOS

2.1 ASPECTOS TÉCNICOS SOBRE EL ENSAYO DEL FLEXIÓN A TRES PUNTOS

En el contexto ingenieril existen diferentes entes normalizadores los cuales dan las pautas para la realización de diferentes ensayos mecánico entre otros aspectos técnicos relevantes industrialmente, entre los cuales podemos encontrar la ASTM (American Society for Testing and Materials), ISO (International Organization for Standardization), NTC (Norma Técnica Colombiana) entre otras. A continuación, se dará una explicación más detallada de cada una de estas Normas.

2.1.1 ASTM (International Organization for Standardization)

ASTM International es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de estándares más grandes del mundo [1]. Definidas y establecidas por la misma industria, los estándares de ASTM mejoran las vidas de millones cada día. [1]

La organización fue fundada el 29 de febrero de 1898, como la sección Americana de la Asociación Internacional para el Ensayo y Materiales (IATM) por iniciativa de Charles Dudley, entonces responsable del control de calidad de Pennsylvania Railroad, quien tuvo la iniciativa de hacer que los hasta entonces ferrocarriles rivales y las fundiciones de acero coordinaran sus controles de calidad, ya que el problema que enfrentaba la creciente industria del ferrocarril era la frecuente rotura de los rieles utilizados. [1]

Según la ASTM se puede tener diferentes normas que rigen el ensayo de flexión de tres puntos dependiendo del material del espécimen a analizar, algunas se pueden encontrar en la Tabla #1 que se encuentra a continuación.

Tabla # 2. 1 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material para el ente de estandarización ASTM

Material	ASTM	Última Actualización
Madera	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D143 - 14 • ASTM D3043 • ASTM D1037-12 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 de Febrero de 2014 • 1 de Noviembre de 2011 • 1 de Mayo 1 de 2012
Metales	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM E290 • ASTM A-438 (hierro fundido) • ASTM A1058 • ASTM E190 (soldaduras dúctiles) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 de Mayo de 2014 • 2011 • 15 de Mayo de 2014 • 15 de Enero de 1992
Acero	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM E290 (ejemplo el 1045 y el 316 inoxidable) • ASTM A370 - 17(Varillas de alta Resistencia) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 de Mayo de 2014 • 1 de Mayo de 2016

2.1.2 ISO (International Organization for Standardization)

La Organización Internacional de Normalización (del nombre original en inglés, International Organization for Standardization, conocida por las siglas ISO) es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización. [4]

Según la ISO se puede tener diferentes normas que rigen el ensayo de flexión de tres puntos dependiendo del material del espécimen a analizar, algunas se pueden encontrar en la Tabla #2 que se encuentra a continuación. [4]

Tabla # 2. 2 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material para el ente de estandarización ISO

Material	ISO	Última Actualización
Madera	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 3133 	<ul style="list-style-type: none"> • Junio de 1973
Metales	<ul style="list-style-type: none"> • ISO 7438 	<ul style="list-style-type: none"> • 15 de Junio de 2005

2.1.3 NTC (Norma Técnica Colombiana)

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), es el Organismo Nacional de Normalización de Colombia. Entre sus labores se destaca la reproducción de normas técnicas y la certificación de normas de calidad para empresas y actividades profesionales. ICONTEC es el representante de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), en Colombia. [5]

Según la NTC se puede tener diferentes normas que rigen el ensayo de flexión de tres puntos dependiendo del material del espécimen a analizar, algunas se pueden encontrar en la tabla #2.3 que se encuentra a continuación.

Tabla # 2. 3 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material para el ente de estandarización NTC

Material	NTC	Última Actualización
Madera	<ul style="list-style-type: none"> • NTC 5525 (bambú, guadua) • NTC 663 (madera en general) 	<ul style="list-style-type: none"> • 26 de Septiembre de 2007 • 25 de Abril de 1973
Concreto/ Hormigón	<ul style="list-style-type: none"> • NTC 2871 (concreto) • NTC 5069 (paneles de fibrocemento) • NTC-4024 (Bloques huecos de hormigón, ladrillos cerámicos) 	<ul style="list-style-type: none"> • 19 de Enero de 2005 • 17 de Julio de 2002 • 21 de Marzo de 2001

2.1.4 OTRAS NORMAS

Existen muchas otras instituciones normalizadoras relacionadas con la estandarización de procesos, y más precisamente para el ensayo de flexión de tres puntos, entre las que se destacan: a) DIN, b) JIS y c) EN. Según estas instituciones se pueden tener diferentes normas que rigen el ensayo de flexión de tres puntos dependiendo del material del espécimen a analizar, las cuales se encuentran definidas en la tabla #2.4.

Tabla # 2. 4 Selección del ensayo de flexión dependiendo del material

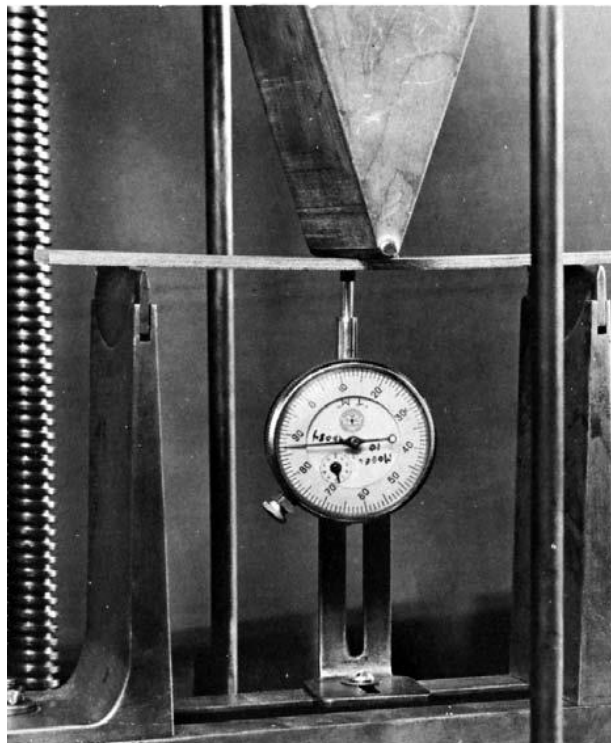
Material	Norma
Madera	<ul style="list-style-type: none">• EN 310, BS 373, BS 5669, EN 310 EN 789, JIS A 5905, JIS A 5906, JIS A 5908• DIN 52186 (madera en general)
Metales	<ul style="list-style-type: none">• JIS Z2248• ANSI/API 5L y AWS B4.0 (soldaduras dúctiles)
Acero	<ul style="list-style-type: none">• BS4449 y EN 10002-1 (Varillas de alta Resistencia)

2.2 SELECCIÓN

En primera instancia la normativa establecida a nivel nacional por la NTC (Norma Técnica Colombiana) se determina que no existen normas que rijan dicho ensayo de flexión para las necesidades específicas de este proyecto, por lo cual se decide optar por las normas establecidas por la ASTM (American Society for Testing and Materials). Se seleccionaron los siguientes estándares: Norma ASTM E290-14, Norma ASTM D143-14 y ASTM D3043 que se describirán brevemente a continuación.

La Norma ASTM D143-14 y ASTM D3043 establece los criterios técnicos para el desarrollo de una prueba de flexión de punto central. Este método es aplicable a un material que sea uniforme con respecto a las propiedades elásticas y de resistencia. La deflexión total y el módulo de elasticidad, incluyen un componente relativamente constante atribuible a la distorsión por cizallamiento. Estos ensayos se encuentran bien adaptados a las investigaciones de muchas variables que influyen en las propiedades de manera uniforme a lo largo de perfil en ensayos controlados y para probar pequeñas muestras extraídas de grandes muestras. [6]

Figura 2. 1 Montaje Prueba de flexión estática (ASTM D 143-14 y ASTM D3043)

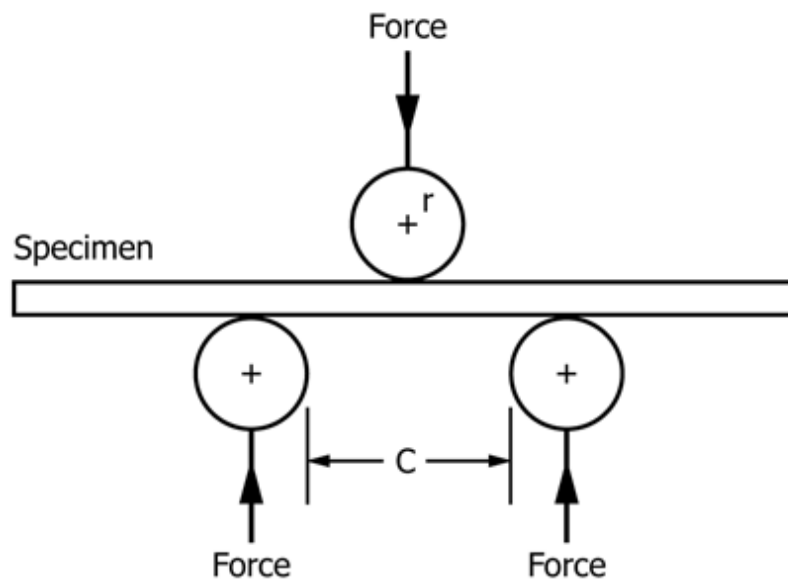


Fuente: Adaptado de [6]

Para la Norma ASTM E 290-14 se tiene que la prueba de curvatura es un método para evaluar la ductilidad, pero no puede considerarse como un medio cuantitativo para predecir el rendimiento del servicio en todas las operaciones de curvado. La severidad del ensayo de

curvatura es principalmente una función del ángulo de curvatura del diámetro interior al que se dobla el espécimen y de la sección transversal del espécimen. Estas condiciones dependen de la ubicación y orientación de la muestra de ensayo y la composición química, las propiedades de tracción, la dureza, el tipo y la calidad del acero especificado. En este método, la velocidad de la flexión no es un factor importante. [7]

Figura 2. 2 Esquema de la Norma ASTM E290-14



Fuente: Adaptado de [7]

A continuación, se tiene una tabla comparativa con un resumen del paso a paso de la realización que tiene cada una de las normas seleccionadas para su aplicación en este proyecto.

Tabla # 2. 5 Comparación de normas ASTM para el ensayo de flexión de tres puntos

Norma ASTM D143-14 y ASTM D3043	Norma ASTM E290-14
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se utiliza una máquina de ensayo convencional de flexión en tres puntos adaptada para especímenes de madera para aplicar y medir el valor de la carga; Y se mide o se registra la deflexión resultante a la mitad del intervalo. 2. La muestra de ensayo deberá ser de sección rectangular (50 mm x 50 mm x 760 mm). 3. Utilice la carga central y una longitud entre el centro de los apoyos de 28 in= 710 mm. 4. Ambos soportes estarán provistos de placas de cojinete y rodillos 5. La prueba procede a una velocidad constante de movimiento de la cabeza hasta que se han recogido suficientes datos de deflexión en el intervalo elástico o hasta que se produce un fallo de la muestra. 6. Para el bloque de carga se utilizará un bloque de carga con un radio de curvatura de aproximadamente una vez y media la profundidad del espécimen. 7. La profundidad de los soportes deberá ser igual o un tanto mayor que la profundidad del espécimen para asegurar que toda la superficie de apoyo este en contactó. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se utiliza una máquina de ensayo convencional de flexión en tres puntos adaptada para especímenes de Acero o metales en general para aplicar y medir el valor de la carga. 2. La muestra de ensayo deberá ser de sección rectangular. 3. La distancia entre los soportes (C) será de tres grosores más dos veces el radio del émbolo, con una tolerancia de medio espesor de la muestra. 4. Las superficies de los soportes y del émbolo deberán ser lo suficientemente duras como para resistir la deformación plástica y el desgaste que puedan observarse después del ensayo. 5. Se ha encontrado que los soportes y émbolos endurecidos hasta al menos 20 HRC son adecuados para esta prueba. 6. Los soportes se pueden fijar o girar libremente. El lubricante puede aplicarse a los soportes y al émbolo. 7. El radio de los soportes deberá ser igual al radio del embolo encargado de aplicar la fuerza.

Continuación Tabla #2.5

<p>8. Aplique la carga con un movimiento continuo de la cabeza móvil a lo largo de la prueba.</p> <p>9. La velocidad de aplicación de la carga debe ser tal que la velocidad máxima de deformación de la fibra sea igual a 0,0015 in/min.</p> <p>10. La carga se aplicará continuamente a lo largo de la prueba a una velocidad de movimiento de la traviesa móvil de 2,5 mm/min.</p> <p>11. Se registrarán las curvas de carga-deformación y se continuará la prueba hasta la carga máxima para todos los ensayos de flexión estática.</p> <p>12. Una situación en la que el usuario puede optar por continuar la prueba y las medidas de carga-deflexión más allá de la carga máxima es si la energía total bajo la curva de flexión de carga-deformación es un parámetro de preocupación.</p> <p>13. Elija incrementos de carga de modo que se registren no menos de 12 y preferiblemente 15 o más lecturas de carga hasta la carga y deflexión correspondiente al límite proporcional.</p> <p>14. Las deflexiones también pueden medirse con medidores de transductores y representarse gráficamente simultáneamente contra la carga.</p>	<p>8. La profundidad de los soportes deberá ser igual o un tanto mayor que la profundidad del espécimen para asegurar que toda la superficie de apoyo esté en contacto.</p> <p>9. La carga deberá ser aplicada con un movimiento continuo de la cabeza móvil a lo largo de la prueba.</p> <p>10. Se registrarán las curvas de carga-deformación y se continuará la prueba hasta la carga máxima para todos los ensayos de flexión estática.</p> <p>11. Elija incrementos de carga de modo que se registren no menos de 12 y preferiblemente 15 o más lecturas de carga hasta la carga y deflexión correspondiente al límite proporcional.</p>
--	---

Fuente: Adaptado de [6] y [7]

2.3 REFERENCIAS

[1] ¿What is ASTM? [¿Qué es ASTM?] [Información corporativa en línea]. Versión 2016.Estados Unidos de América, s.f. [citado el 15 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<https://www.astm.org/ABOUT/factsheet.html>>.

[2] Comisión Económica de las Naciones Unidas “Actos adoptados por órganos creados mediante acuerdos internacionales” Reglamento N ° 66 para Europa (CEPE), La serie 02 de modificaciones, con fecha de entrada en vigor el 19 de agosto de 2010.

[3] Acerca de ANSYS. [Información corporativa en línea]. Versión 2017. Estados Unidos de América, s.f. [citado el 18 marzo de 2017].

Disponible en Internet:<<http://www.ansys.com/es-ES/About-ANSYS>>.

[4] Acerca de ISO Tools. [Información corporativa en línea]. Versión 2017. Estados Unidos de América, s.f [citado el 19 marzo de 2017].

Disponible en Internet:<<https://www.isotools.org/normas/>>.

[5] Nuestra Historia. [Información corporativa en línea]. Versión 2017.Colombia, s.f. [citado el 22 marzo de 2017].

Disponible en Internet:<<http://www.icontec.org/NC/QS/Paginas/nh.aspx>>.

[6] Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure Norm ASTM D3043 [Métodos de prueba estándar para paneles estructurales en flexión Norma ASTM D3043]. [Documento PDF en línea]. 1ª Edición. Estados Unidos de América. Originally approved in 1972. Edición actual aprobada en Nov. 1, 2011. ASTM.

[7] Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility Norm ASTM E 290/14 [Métodos de prueba estándar para la prueba de flexión de material para la ductilidad Norma ASTM E 290-14]. [Documento PDF en línea]. 1ª Edición. Estados Unidos de América. Originally approved in 1966. Edición actual aprobada en May. 1, 2014. ASTM.

CAPITULO 3

CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE PRUEBA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se definirán las diferentes probetas a analizar; se tomará en cuenta su geometría, el tipo de material, propiedades mecánicas, la disponibilidad en el mercado regional, entre otros aspectos técnicos; de ahora en adelante nos referiremos a las Probetas/Perfiles como “Perfiles estructurales”.

3.2 GEOMETRÍA

En cuanto a la geometría, las empresas locales dedicadas a la construcción de superestructuras de buses de servicio público utilizan principalmente la siguiente gama de perfiles estructurales, los cuales se consignan en la Tabla # 3.1.

Tabla # 3. 1 Perfiles más utilizados regionalmente

Vehículos Grades Cl 12 y Cl 14	Vehículos Pequeños Cl 12 y Cl 14
50x50	40x40
70x50	60x40
50x40	

Siendo Cl 12 y Cl 14 los diferentes calibres en que viene fabricada la chapa metálica definiendo la sección transversal del espécimen; correspondiendo **Cl 12 =2,66mm** y **Cl 14 =1,90mm** de espesor de chapa metálica y estando todas las dimensiones en milímetros

3.3 MATERIAL

El material del cual están hechos los perfiles estructurales corresponde a un Acero A36, siendo este una aleación de acero al carbono de propósito general comúnmente usado en los

Estados Unidos. La denominación A36 fue establecida por la ASTM (American Society for Testing and Materials), representa (A para materiales ferrosos, 36 es un número secuencial, sin ninguna relación con las propiedades del metal) y es utilizado en aplicaciones estructurales. El acero A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: a) planchas, b) perfiles estructurales, c) tubos, d) barras, e) láminas, f) platinas y d) ángulos.

En la siguiente tabla se muestran algunos valores aproximados de las propiedades mecánicas más relevantes para la simulación y realización del ensayo de los perfiles estructurales.

Tabla # 3. 2 Propiedades mecánicas correspondientes al Acero A36

Propiedad	Valor
Porcentaje de carbono	0,16%
Porcentaje de manganeso	0,59%
Porcentaje de fosforo	0,02%
Porcentaje de azufre	0,01%
Dureza	HRB
Alargamiento	35,00%
Resistencia a la tensión (σ_u)	617 [Mpa]
Limite elástico (σ_s)	324 [Mpa]

Fuente: Adaptado de [1]

Debido a que en este ensayo de flexión se desea llevar el espécimen más allá de su zona elástica, se deben introducir en el software ANSYS los valores correspondientes al esfuerzo (σ), contra deformación unitaria (ϵ) de la zona plástica correspondiente al acero A36, tales datos fueron obtenidos mediante un ensayo de tracción, realizado bajo los estándares ASTM que rigen dicho ensayo y los valores obtenidos se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla # 3. 3 Valores de Esfuerzo y Deformación Unitaria correspondientes a la zona plástica para el Acero A36

Deformación Unitaria (ϵ) [mm/mm]	Esfuerzo δ [Mpa]
0,00E+00	324,00
7,00E-04	339,76
1,30E-03	355,20
1,90E-03	380,09
2,50E-03	390,65
3,10E-03	401,53
3,80E-03	416,98
4,30E-03	432,42
4,90E-03	447,87
5,70E-03	463,31
6,40E-03	478,75
6,90E-03	494,20
7,80E-03	509,64
8,70E-03	525,08
9,80E-03	540,53
1,11E-02	555,97
1,27E-02	571,41
1,52E-02	586,86

Continuación Tabla #3.3

2,04E-02	602,30
3,26E-02	617,00

Fuente: Adaptado de [2]

3.4 DISPONIBILIDAD REGIONAL

En el contexto regional algunos de los perfiles mostrados en la tabla #3.1 no son sencillos de conseguir con los proveedores locales, una vez realizada la selección según disponibilidad se determinó cuáles serían los perfiles estructurales a usar en la simulación del ensayo de flexión, dicha información se consignó en la tabla #3.4.

Tabla # 3. 4 Dimensiones de los perfiles estructurales a utilizar en el ensayo de flexión de tres puntos

Vehículos Grades Cl 12 y Cl14	Vehículos Pequeños Cl 12 y Cl14
50x50	40x40
	60x40

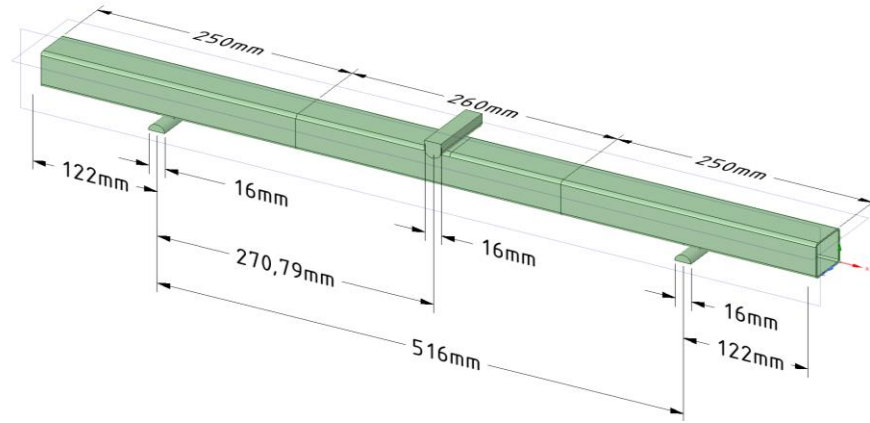
Fuente: Adaptado de [3]

Se tomarán especímenes con longitudes de 760 mm cada una con para cumplir lo establecido en las Normas ASTM D3043 y ASTM E 290-14, donde se establece la ubicación y el radio de curvatura del punzón y los apoyos [4] [5].

3.5 ESQUEMA DE LA GEOMETRÍA

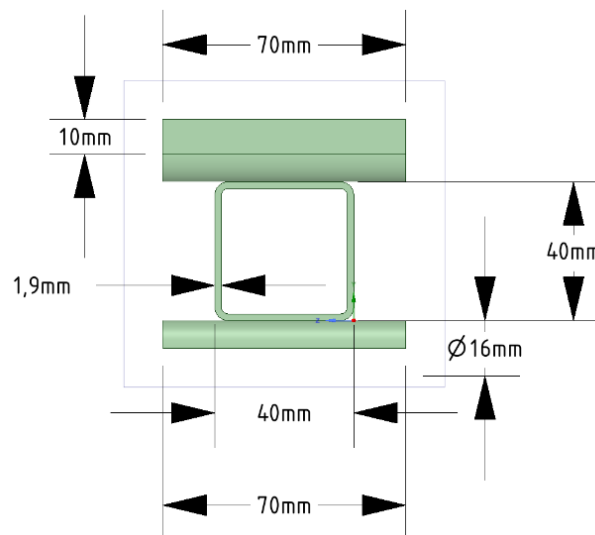
Para realizar el proceso de simulación del ensayo de flexión bajo los entandares que exige la ASTM, se deben adecuar algunas características geométricas y de montaje. Para entenderlo más fácilmente, se muestran a continuación dos esquemas (Figura 3.1 y Figura 3.2) con las medidas básicas necesarias para el modelado, tomando como ejemplo el perfil estructural 40x40 Cl 14 para la representación del montaje virtual.

Figura 3. 1 Medidas longitudinales básicas correspondientes al perfil estructural a utilizar en el montaje del ensayo de flexión



En la figura 3.1 se muestra las medidas como la longitud total del perfil estructural (760 mm), la ubicación de los apoyos y su distancia entre el centro (516mm), la ubicación del cabezal, los diámetros de cabezal y apoyos (16mm), la profundidad de los apoyos (70mm) y del cabezal (70mm), son configurados para todos los tipos de perfiles estructurales seleccionados para la simulación computacional para la flexión a tres puntos.

Figura 3. 2 Medidas Transversales básicas correspondientes al perfil estructural a utilizar en el montaje del ensayo de flexión



Las medidas mostradas en la figura 3.2 , corresponden a la sección transversal del perfil estructural (40mm x 40mm) calibre 14 el cual equivale a un espesor de (1,9mm), la altura del punzón (10mm) y la profundidad del punzón y los apoyos (70mm).

3.6 REFERENCIAS

- [1] Aceros Cortados S.A. Acero A36. [Documento PDF en línea]. Colombia, Publicado el 20 de Mayo de 2014. [Citado el 17 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<http://www.aceroscortados.com>>.
- [2] Universidad Tecnológica de Pereira. Ensayo de tracción y Compresión Acero A36 Informe de laboratorio. Colombia: Laboratorio de Resistencia de Materiales UTP. Ingeniera Luz Adriana Mejía, 2017.
- [3] Tubería Estructural. [Información página Web en línea]. Versión 2017. Colombia, s.f. [citado el 26 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<http://www.acerosmapa.com.co/index.php/productos/tuberias/tuberia-estructural>>.
- [4] Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure Norm ASTM D3043 [Métodos de prueba estándar para paneles estructurales en flexión Norma ASTM D3043]. [Documento PDF en línea]. 1ª Edición. Estados Unidos de América. Originally approved in 1972. Edición actual aprobada en Nov. 1, 2011. ASTM.
- [5] Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility Norm ASTM E 290/14 [Métodos de prueba estándar para la prueba de flexión de material para la ductilidad Norma ASTM E 290-14]. [Documento PDF en línea]. 1ª Edición. Estados Unidos de América. Originally approved in 1966. Edición actual aprobada en May. 1, 2014. ASTM.

CAPITULO 4

CONDICIONES DE FRONTERA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se tratarán temas pertinentes a todas las consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta al momento de modelar el ensayo de flexión de tres puntos mediante el software ANSYS. Se considerarán aspectos como la geometría, el mallado, los modelos propuestos para el material, la configuración de los contactos y las restricciones para el análisis estructural.

4.2 SISTEMA DE ANÁLISIS

Se decide realizar la simulación en dos diferentes sistemas de análisis Static Structural y Explicit Dynamics. Ya que el ensayo de flexión es una prueba estática se utiliza el Static Structural para los diferentes resultados que se desean obtener de la simulación como lo son (el análisis de independencia de malla, la deformación total de todo el sólido, el esfuerzo normal, El ángulo de deflexión de la viga, la deformación direccional del perfil estructural, el valor de la fuerza de reacción del punzón y de los apoyos).

Mientras que el sistema de análisis Explicit Dynamics, se va a utilizar para ver en detalle el comportamiento de las grietas y fisuras que se generan por la falla a flexión debido al colapso por alcanzar el límite de resistencia máxima.

4.3 GEOMETRÍA

De acuerdo a las recomendaciones definidas en las normas ASTM se modelan las geometrías para diferentes perfiles estructurales, partiendo de un croquis en 2D definiendo

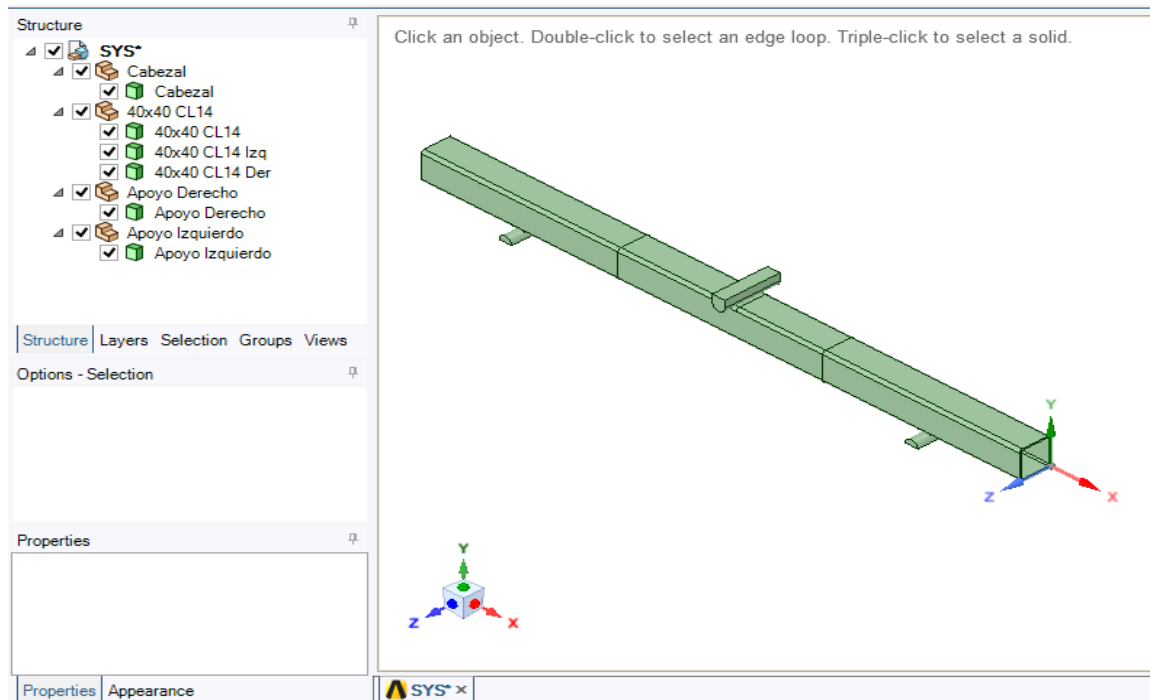
las cotas correspondientes a la sección transversal de cada perfil, posteriormente se lleva a un modelo 3D en donde se le harán algunas modificaciones especiales a la geometría, como la segmentación del perfil estructural en tres partes diferentes, las cuales serán consideradas como un solo solido multicuerpo.

Las geometrías definidas para el perfil de prueba está compuesta por cuatro componentes definidos por solidos multicuerpo:

- a) Cabezal: este sólido corresponde al punzón móvil que se encargará de aplicar la fuerza para flectar el perfil estructural;
- b) Apoyo derecho: Este sólido corresponde al apoyo ubicado en el lado derecho inferior, es un elemento fijo y no presentará desplazamiento;
- c) Apoyo Izquierdo: Este sólido corresponde al apoyo ubicado en el lado izquierdo inferior, es un elemento fijo y no presentara desplazamiento;
- d) 40x40 Cl 14: Este solido multicuerpo está compuesto por tres diferentes sólidos que son (40x40 Cl 14 centro, 40x40 Cl 14 Izq, 40x40 Cl 14 Der) que hace referencia a la parte central, izquierda y derecha del perfil estructural.

En la figura 4.1 se puede ver dicha consideración publicada en el editor de geometría SpaceClaim perteneciente al software ANSYS.

Figura 4. 1 Geometría del perfil estructural 40x40 Cl 14 tomado como ejemplo



De la Figura 4.1 se tiene que cada una de las geometrías pertenece a un componente individual; En lo que respecta al componente (40x40 cl 14) que hace referencia a la geometría del perfil estructural, se divide el cuerpo en 3 secciones diferentes, con el fin de enfatizar el mallado en la parte central del perfil estructural ya que se sabe que ahí es donde estará presente en mayor esfuerzo de flexión y requiere que la malla sea refinada.

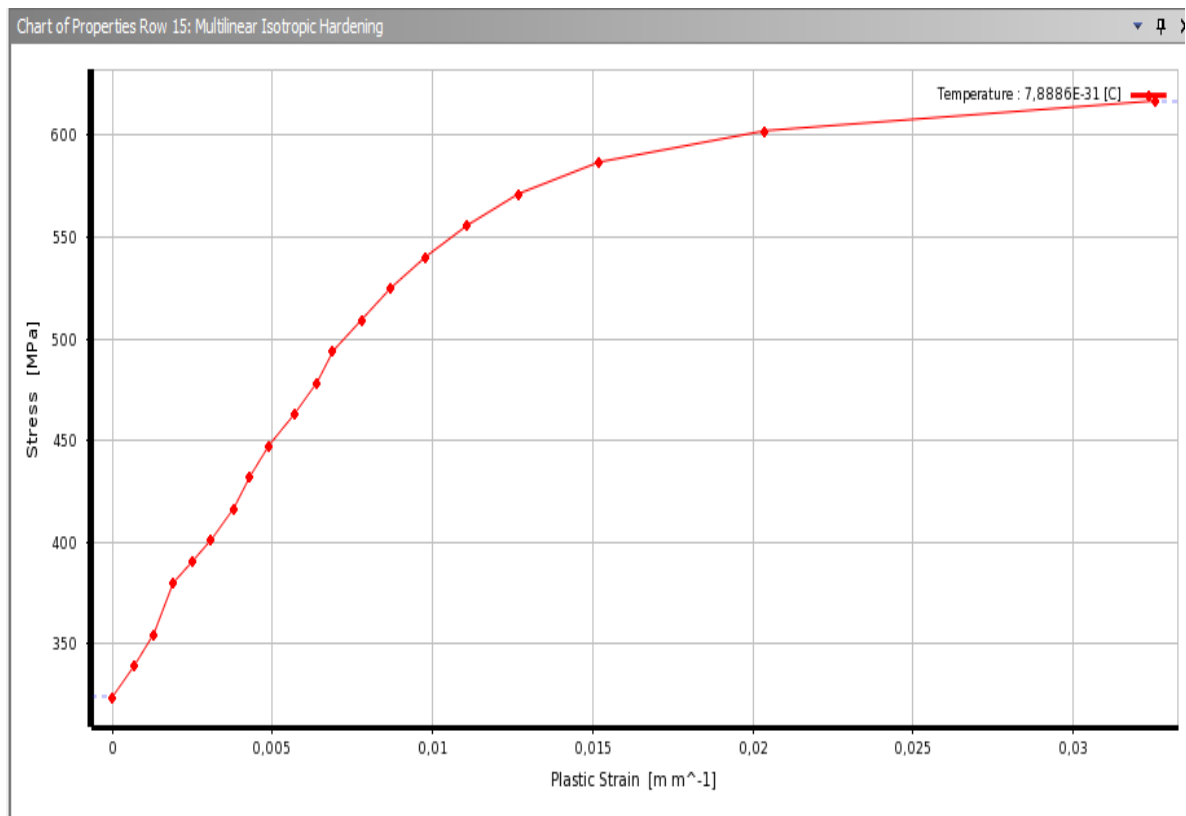
El contacto entre las tres secciones del perfil estructural (Izquierda, Central, Derecha), asegura que este se comporte como un sólido multicuerpo, para esto se utiliza la configuración de geometría compartida (Share).

4.4 MATERIAL

Para trabajar la zona plástica del material, existen diferentes modelos matemáticos. El modelo que acá se trabaja es el “Multilinear Isotropic Hardening” donde se tabulan los valores de deformación plástica unitaria y de esfuerzo para cada una de las deformaciones. Se pretende llevar el espécimen más allá de su zona elástica por lo que se hace necesario tener los valores correspondientes a la zona plástica. Una vez se tabulen dichos datos, se obtendrá la gráfica que se muestra en la Figura 4.2, correspondiente a la zona Plástica del diagrama Esfuerzo- Deformación unitaria del Acero A36.

Se pretende llevar el espécimen más allá de su zona elástica por lo que se hace necesario tener los valores correspondientes a la zona plástica

Figura 4. 2 Diagrama Esfuerzo vs Deformación unitaria plástica para el Acero A36



Aunque existen diferentes modelos matemáticos, se optó por trabajar con el “Multilinear Isotropic Hardening” ya que los datos necesarios para este modelo matemático, son obtenidos de un análisis de ensayo de tracción de un Acero A36 realizado con anterioridad.

En la tabla #4.1 se muestran las propiedades generales, mecánicas y térmicas utilizadas para crear el Acero A36 en la sección “Engineering Data” del sistema de análisis “Static Structural”.

Tabla # 4. 1 Propiedades utilizadas para crear el modelo de un Acero A36 en el software ANSYS

Propiedades	Unidades
Densidad	7860 [kg/m ³]
->Isotropic Secant Coefficient of thermal expansion	
Coeficiente de expansión térmica	1,2x10 ⁻⁵ [1/°C]
->Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulos and Poisson's ratio
Young's Modulos	2,1x10 ¹¹ [Pa]
Poisson's Ratio	0,29
Bulk Modulus	1,66x10 ¹¹ [Pa]
Shear Modulus	8,139x10 ¹⁰ [Pa]
->Multilinear Isotropic Hardening	
->Alternating Stress Mean Stress	
->Strain-Life Parameters	
Strenght Coefficient	9,2x10 ⁸ [Pa]
Strenght Exponent	-0,106
Ductility Coefficient	0,213
Ductility Exponent	-0,47

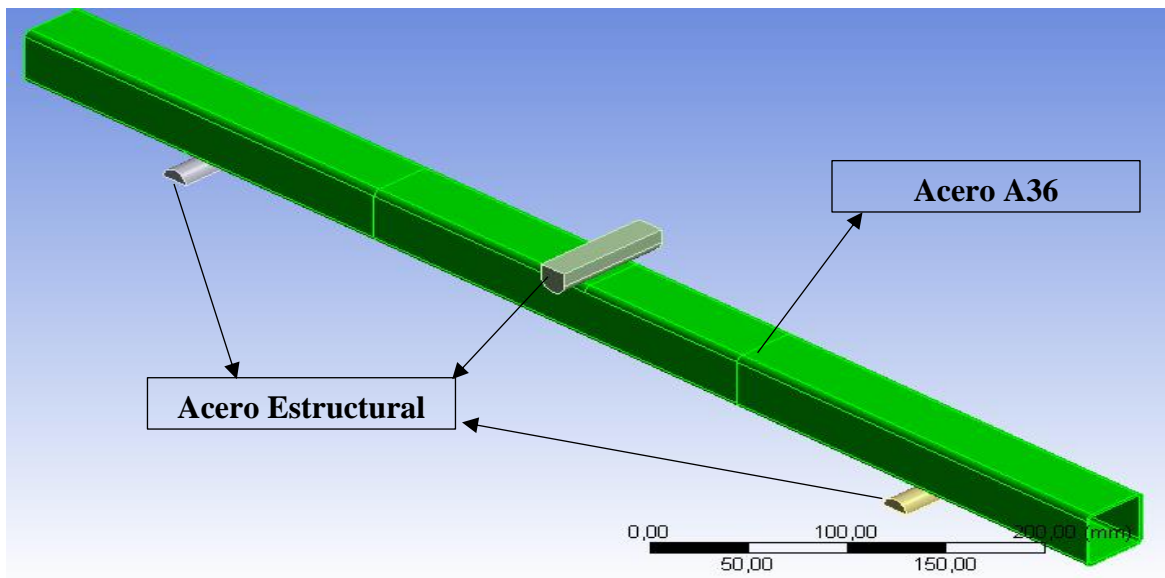
Continuación Tabla #4.1

Cyclic Strenght Coefficient	1×10^9 [Pa]
Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2
Tensile Yield Strenght	324×10^6 [Pa]
Compressive Yield Strenght	324×10^6 [Pa]
Tensile Ultimate Strenght	617×10^6 [Pa]
Compressive Ultimate Strenght	617×10^6 [Pa]

La asignación de estos datos permite que el análisis computacional realizado mediante la simulación de los diferentes perfiles, se ajuste de manera conforme al comportamiento real del material.

Se asignó el material Acero A36 al solido 40x40 Cl 14, mientras que a los sólidos Apoyo Izquierdo, Apoyo Derecho y Cabezal se les asigno un material predeterminado (Structural Steel), como se muestra en la figura 4.3.

Figura 4. 3 Configuración del material para los diferentes cuerpos pertenecientes a la Geometría de la simulación



4.5 CONSIDERACIONES DE MALLADO

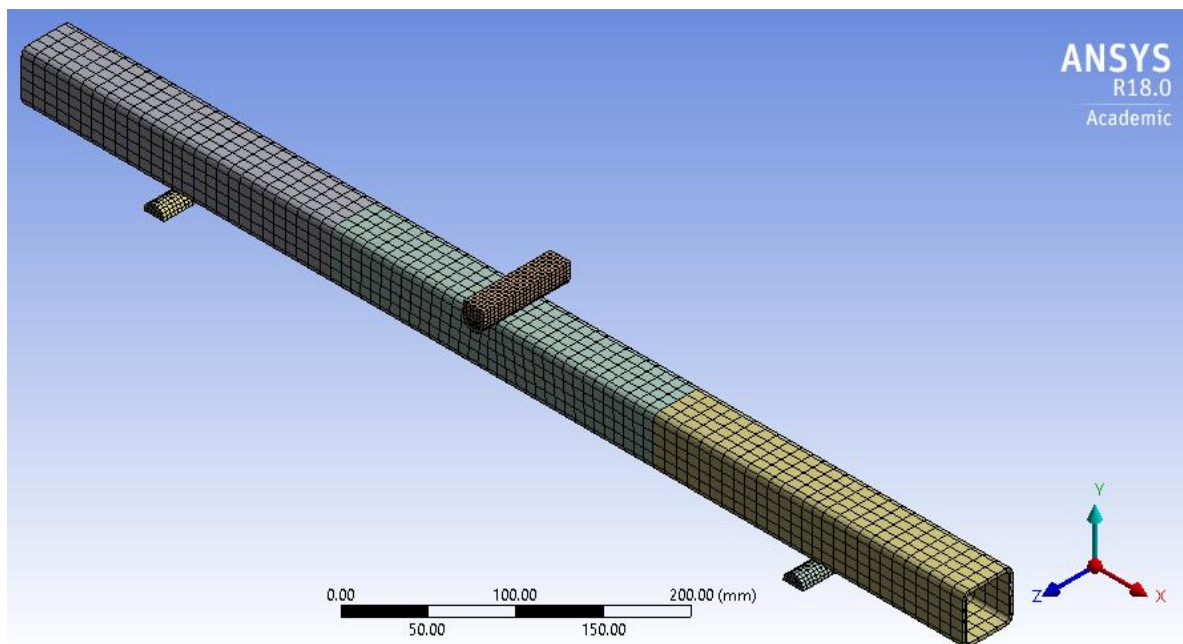
Uno de los factores más importantes a la hora de realizar una simulación por medio de elementos finitos, es el mallado de la geometría que va a ser objeto de la simulación. [1]

Es importante la selección del tipo de malla. Al respecto han de considerarse los siguientes aspectos: a) Convergencia de resultados y b) Costo computacional.

El número de nodos que pueda tener una geometría está directamente relacionado con el tamaño del elemento finito y la geometría del cuerpo discretizado, en este proyecto se usa una forma hexagonal de los elementos finitos. Para determinar un tamaño adecuado de los elementos que conforman el mallado, se utiliza el criterio de independencia de malla.

Se trata de mallar el perfil estructural con diferentes tamaños del elemento finito y calcular cómo será la variación del esfuerzo normal, el valor más adecuado para el tamaño del elemento finito será aquel que garantice un valor de esfuerzo convergente.

Figura 4. 4 Mallado de las tres secciones que conforman el componente del perfil 40x40 C112



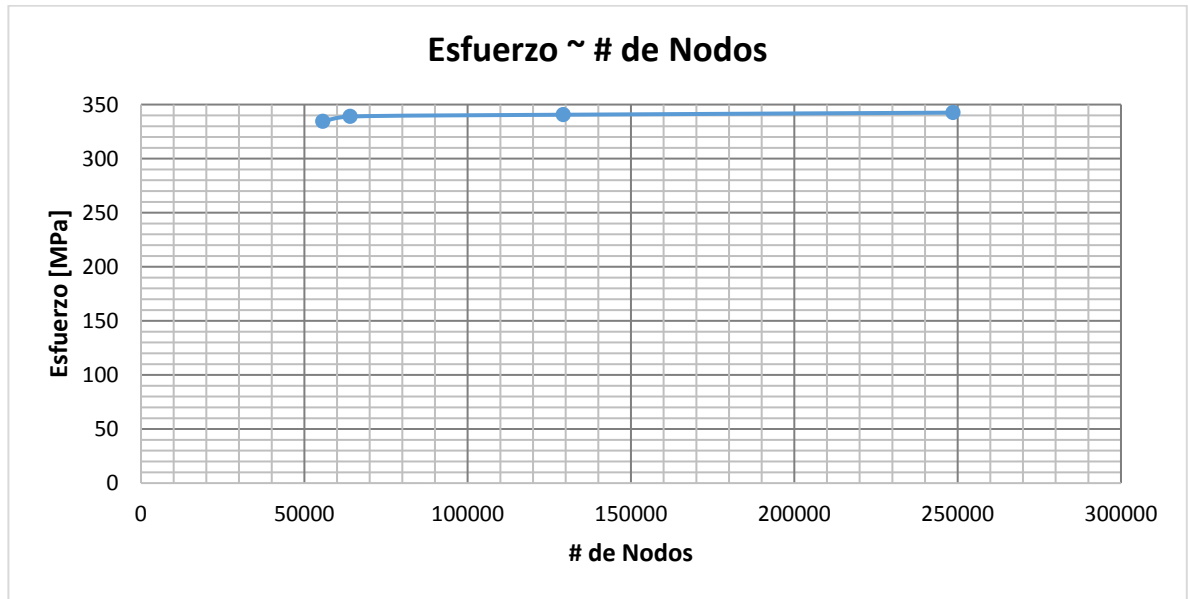
En esta simulación se optó por aplicar un mallado más fino en la parte central, tal y como se observa en la Figura 4.1. Se aplica este criterio para obtener una correcta convergencia de los resultados, en base al hecho que teóricamente [2], una viga simplemente apoyada en sus extremos, experimentara el valor de esfuerzo máximo en su sección central transversal, si la sollicitación de carga es simétrica respecto a la viga y es concentrada; Lo anterior, demandará una mejor calidad de malla en la parte central del perfil. Sin embargo es necesario asegurar que la transición de la malla entre la sección central y las exteriores sea progresiva y suave, por lo que para cada variación del tamaño, se configuró con un tamaño de elemento entre las conexiones igual al tamaño de la sección central. En la Tabla # 4.2 se ilustra el comportamiento del Esfuerzo (δ) según el número de nodos.

Tabla # 4. 2 Datos calculados mediante la simulación para realizar la Independencia de malla del espécimen 40x40 CL12

Tamaño mm	# Nodos	Esfuerzo Mpa	%Aumento
8	55688	334,510	1,333%
7	64058	338,970	0,481%
3	129270	340,600	0,567%
2	248626	342,529	

La figura 4.5 muestra el análisis de independencia de malla utilizando los valores de la Tabla #4.2, usando como ejemplo el Perfil estructural 40x40 cl 12.

Figura 4. 5 Grafica de Independencia de malla basado en el espécimen 40x40 CL 12



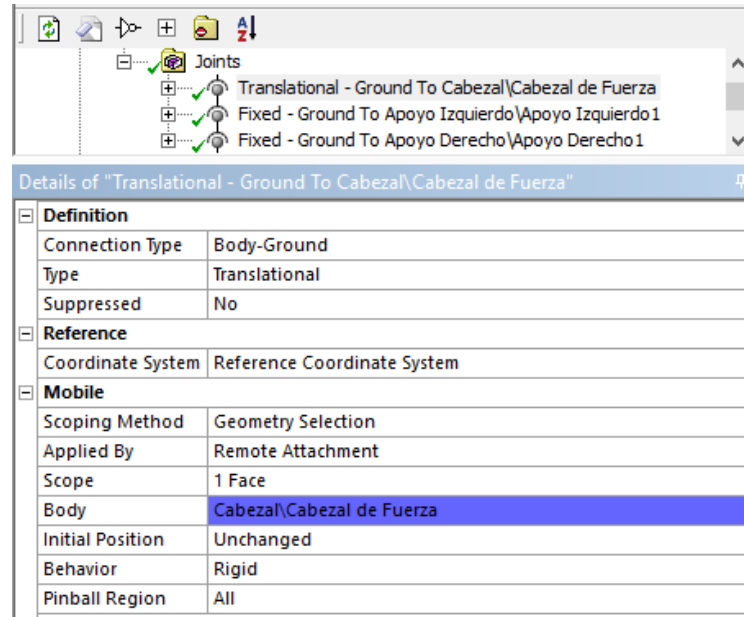
En la Figura 4.7 se tiene que los datos del esfuerzo máximo presentes en el perfil tienden a converger en un valor promedio de $400 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, de donde se selecciona un valor de 1.304.410 millones de nodos correspondiente a un tamaño de mallado de 3mm teniendo en cuenta las consideraciones ya mencionadas.

4.6 CONFIGURACIÓN DE CONTACTOS

El contacto entre los diferentes cuerpos de una simulación es de gran importancia ya que hace parte de las condiciones de frontera y afecta significativamente el comportamiento de la simulación. La interacción entre cuerpo y cuerpo definirá casi por completo los resultados que se obtengan.

Teniendo conocimiento previo de que los esfuerzos de contacto generados por la interacción entre cuerpo y cuerpo exceden en gran proporción a los esfuerzos por flexión que se va a presentar internamente en el perfil [2], para la simulación del ensayo de flexión se optó por la configuración mostrada en la figura 4.6 y la figura 4.7.

Figura 4. 6 Configuración de los contactos de tipo Joint entre los apoyos, el cabezal y el perfil



Teniendo en cuenta que el contacto entre el perfil con los apoyos y el cabezal debe tener la libertad de rotar en el plano XY (o alrededor del eje Z), a medida que el cabezal aplica la fuerza en el perfil estructural, las fibras superiores se contraen y las fibras inferiores se traccionan, generando una rotación de la línea neutra del perfil estructural respecto al eje Z y dicha rotación se manifiesta alrededor de cada uno de los apoyos.

El contacto entre las dos superficies también debe limitar el desplazamiento longitudinal en el eje Z y asegurar que los cuerpos no se separen en ningún momento.

En la figura 4,7 se observa la configuración de los contactos entre los apoyos el cabezal y el perfil estructural.

Figura 4. 7 Configuración de los contactos entre los apoyos, el cabezal y el perfil

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	3 Faces
Target	1 Face
Contact Bodies	40X40 CL12
Target Bodies	Cabezal\Cabezal de Fuerza
[-] Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
[-] Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Nodal-Normal To Target
Normal Stiffness	Manual
Normal Stiffness Factor	0.1
Update Stiffness	Each Iteration
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	10. mm
Time Step Controls	None
[-] Geometric Modification	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

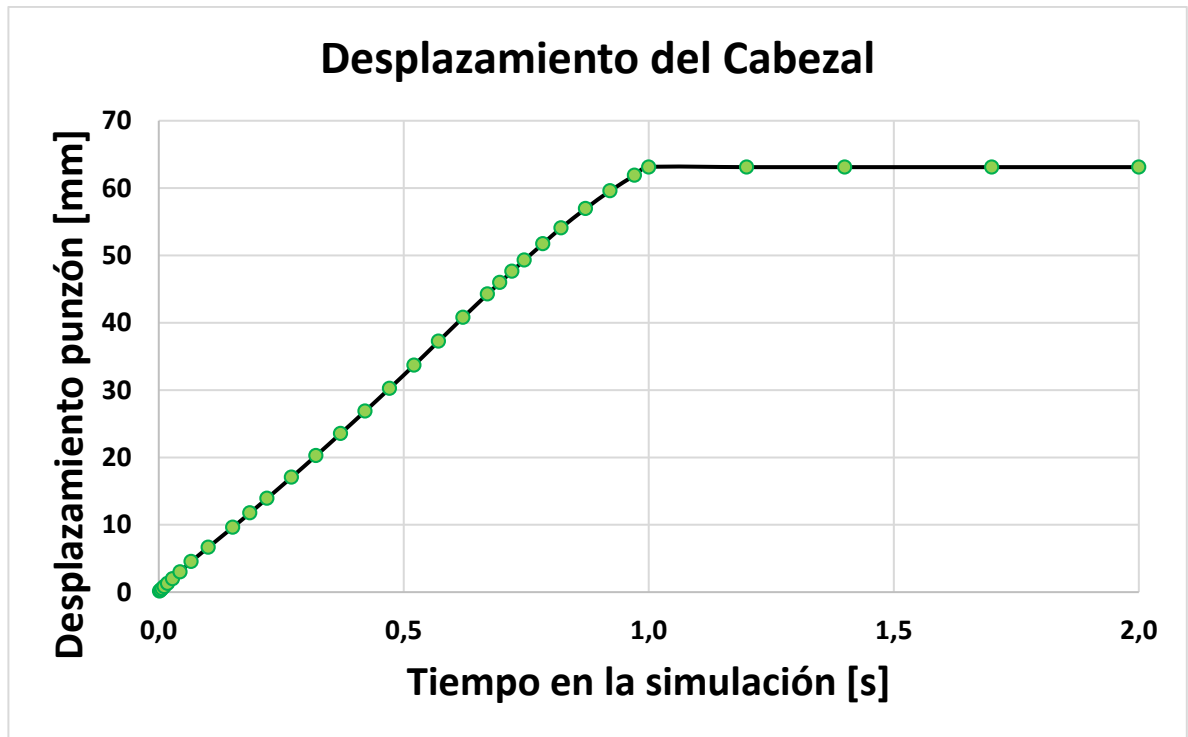
4.7 DESPLAZAMIENTO DEL PUNZÓN

Para poder ejercer la flexión en el perfil estructural, se debe desplazar verticalmente el sólido correspondiente al punzón en dirección negativa del eje Y, ejerciendo una fuerza concentrada en el centro longitudinal del perfil, dicho desplazamiento generará una fuerza de reacción cuyos valores son extraídos mediante un resultado.

El tipo de desplazamiento configurado es (Joint-Displacement) que permitirá que el cabezal se mueva verticalmente y a su vez que las superficies pertenecientes a el perfil estructural,

se deslicen sin fricción alrededor de la superficie del cabezal o punzón, a medida que se va deformando el perfil debido a la flexión.

Figura 4. 8 Aumento del Joint Displacement durante de la simulación

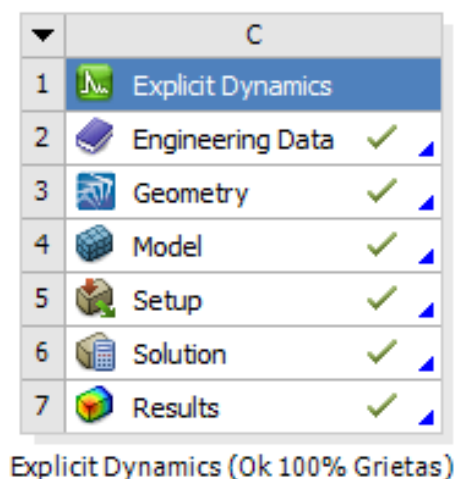


Se configuro un desplazamiento vertical en la dirección negativa del eje Y, equivalente a 63,1mm este desplazamiento a lo largo de la simulación se muestra en la figura

4.8 CONFIGURACIÓN SISTEMA DE ANÁLISIS EXPLICIT DYNAMICS

Como se mencionó en primera instancia el sistema de análisis Explicit Dynamics, se va a utilizar para lograr ver en detalle el comportamiento de las grietas y fisuras que se generarán por la falla mecánica del perfil estructural debido a los esfuerzos de flexión.

Figura 4. 9 Sistema de Análisis Explicit Dynamics



Para trabajar la zona plástica de los materiales en este sistema de análisis, existen diferentes modelos matemáticos. El modelo que se trabaja es el “Johnson Cook Strength” en donde se configuran diferentes constantes tomadas de la literatura [2] propias del material del perfil estructural (Acero A36), como lo es la constante de endurecimiento ($7,8 \times 10^8$ Pa), el exponente de endurecimiento (0,1363), el esfuerzo de fluencia ($3,24 \times 10^8$ Pa), Constante de velocidad de deformación (0,0134) y la temperatura de fusión (1505 °C), esta configuración se muestra en la tabla #4.3 .

Tabla # 4. 3 Propiedades utilizadas para crear el modelo de un Acero A36 en el sistema de análisis Explicit Dynamics

Propiedades	Unidades
Densidad	7860 [kg/m ³]
->Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulos and Poisson's ratio
Young's Modulos	$2,1 \times 10^{11}$ [Pa]

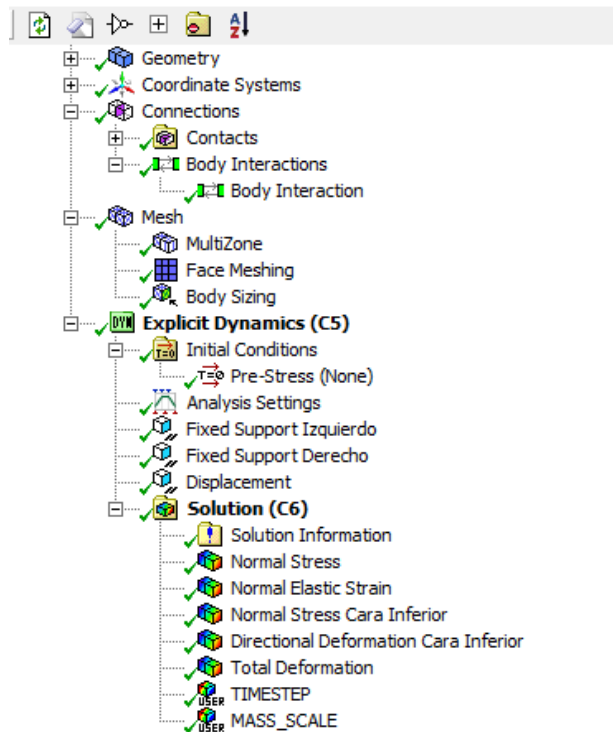
Continuación Tabla #4.3

Poisson's Ratio	0,29
Bulk Modulus	$1,66 \times 10^{11}$ [Pa]
Shear Modulus	$8,139 \times 10^{10}$ [Pa]
Specific Heat	434 [JxKg ⁻¹ xJ ⁻¹]
Johnson Cook Strenght	
->Strain Rate Correction	First-Order
Initial Yield Stress	$3,24 \times 10^8$ [Pa]
Hardening Constant	$7,8 \times 10^8$ [Pa]
Hardening Exponent	0,1363
Strain Rate Constant	0,0134
Thermal Softening Exponent	1
Melting Temperatura	1505 °C
Reference Strain Rate	1

En este sistema de análisis no es necesario configurar los contactos entre el perfil estructural, los apoyos y el cabezal de fuerza, ya que automáticamente son detectados por él.

Otro aspecto en la configuración es el mallado del perfil estructural que a excepción de la configuración que se usaba en el sistema de Análisis Static Structural, en el Explicit el mallado debe ser mucho más fino para lograr observar las grietas y las fallas que se van a presentar por la flexión; La geometría del elemento finito es Hexaédrico cuyo tamaño de malla usado es de 2 mm para el perfil estructural, mientras que para los elementos en contacto , como el cabezal y los apoyos es de 0,8 mm.

Figura 4. 10 Configuración general en el sistema de Análisis Éxplicit Dynamics



Entre las configuraciones a resaltar esta que el perfil estructural no posee un estrés inicial, o sea que no está precargado estáticamente con fuerzas o presiones externas. El apoyo izquierdo y derecho sigue siendo fijo sin presentar movimiento alguno.

Dentro de los resultados necesarios en este Sistema de análisis está el TIMESTEP y el MASS_SCALE, que son configuraciones especiales para poder observar un comportamiento más real y claro, de cómo, cuándo y dónde se presentaran las grietas y fisuras en las superficies del perfil estructural.

En este sistema de análisis a diferencia del Static Structural, el tiempo a simular es reducido teniendo un máximo de un segundo en tiempo real, por tal motivo la configuración usada

en el (Análisis Settings), debe ser más minuciosa, aumentando el número máximo de ciclos a (1×10^7), cuyo valor está asociado al número de iteraciones que realiza el software para la convergencia de los resultados, esta configuración se muestra en la tabla #4.4.

Tabla # 4. 4 Configuración usada en el Análisis Settings usada en el sistema Éxplicits Dynamics

Análisis Settings	
Type	Program Controlled
Step Controls	
Resume From Cycle	0
Maximum Number Of Cycles	1×10^7
End Time	1×10^{-3}
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimun Time Step	Program Controlled
Maximun Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Charecteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	Yes
Minimun CFL Time Step	$1,62215 \times 10^7$ [s]
Maximun Element Scaling	100
Maximun Part Scaling	5×10^{-2}
Update Frecuency	0

Para poder observar las grietas y fallas en la superficie del perfil estructural de una manera más cercana a la realidad, se deben hacer las configuraciones correspondientes a la erosión,

siendo de gran importancia el coeficiente (Geometric Strain Limit) equivalente a 1,5 [2], esta configuración se muestra en la tabla #4.5.

Tabla # 4. 5 Configuración de erosión usada en el análisis settings, en el sistema explicit dynamics

Erosion Controls	
On Geometric Strain Limit	Yes
Geometric Strain Limit	1,5
On Material Failure	Yes
On Minimum Element Time Step	No
Retain Inertia of Eroded Material	Yes

Para poder ejercer la flexión en el perfil estructural se debía desplazar verticalmente el sólido correspondiente al punzón en dirección negativa del eje Y, ejerciendo una fuerza concentrada en el centro longitudinal del perfil, dicho desplazamiento es de 80 mm, su configuración se muestra en la tabla 4.6.

Tabla # 4. 6 Configuración del desplazamiento del cabezal

Steps	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	0	0	0	0
1	1×10^{-3}	0	-80	0

4.9 REFERENCIAS

[1] Influencia de la Calidad de malla en las Simulaciones. Uso de condiciones de contorno periódicas. [Documento PDF en línea]. 1ª Versión. Lugar de publicación desconocido. S.f. [citado el 30 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<bibing.us.es/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+Único%252F07.ANEXO+I.pdf>.

[2] BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R y DEWOLF John T. Mecánica de Materiales. 4ª Ed. [s.l.], McGraw-Hill, 2006.

CAPITULO 5

RESULTADOS

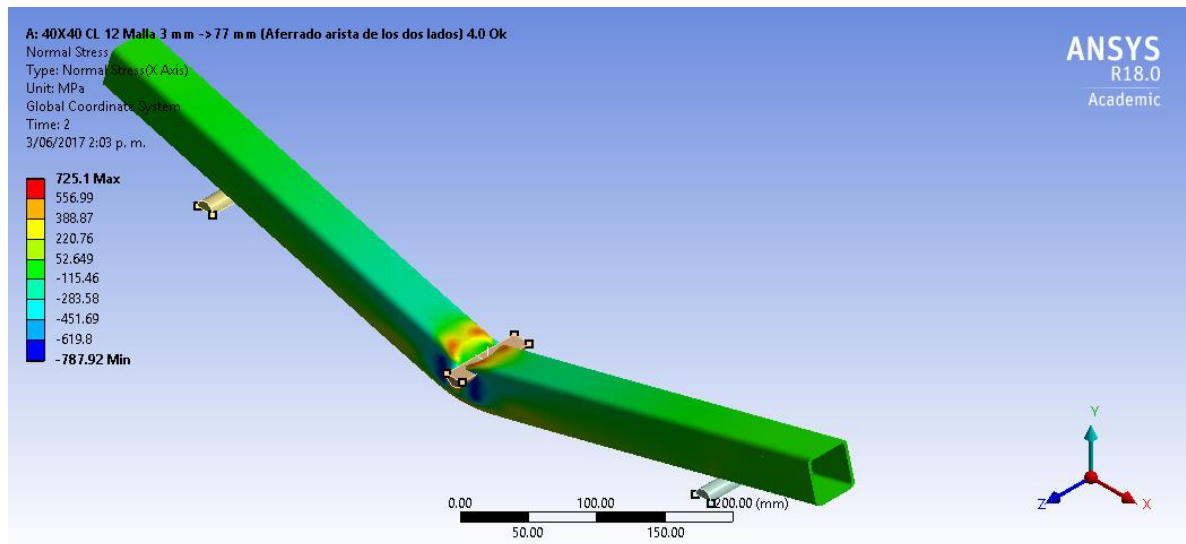
5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizarán e interpretarán los resultados obtenidos mediante la simulación, siendo objeto de análisis la deformación máxima que presentará el espécimen, así como el esfuerzo máximo, el momento flector máximo y el ángulo de deformación.

5.2 ESFUERZO NORMAL

Según el comportamiento físico del ensayo, uno de los resultados de interés son los valores de esfuerzo normal presente en una sección transversal a lo largo del eje axial de la viga.

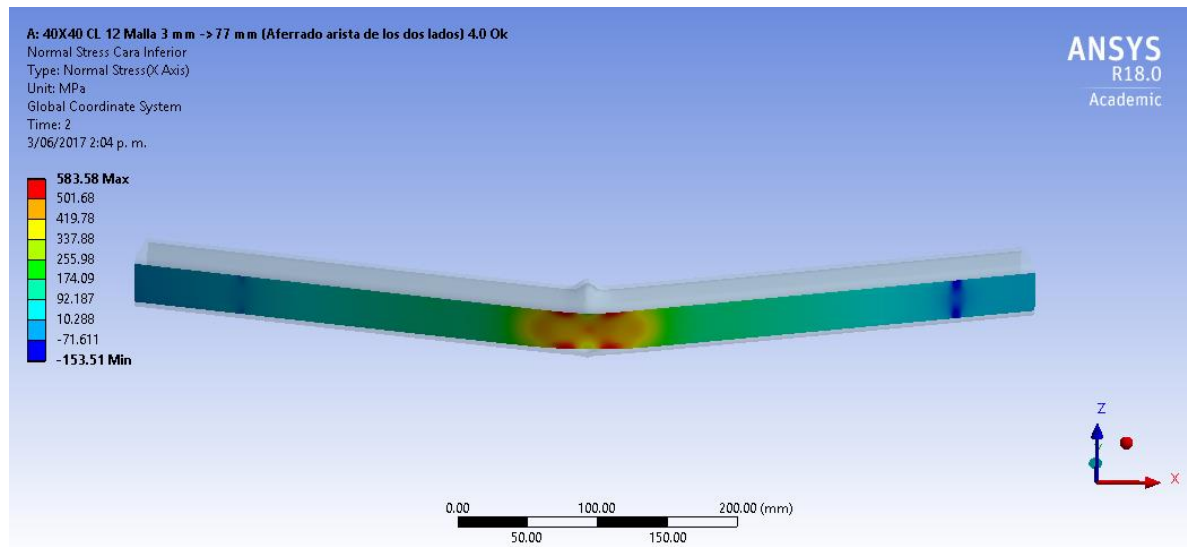
Figura 5. 1 Esfuerzo normal presente en todo el perfil estructural 40x40 C112



En la figura 5.1 se puede observar el comportamiento del esfuerzo normal en el perfil., en el cual se presenta en la superficie superior un valor del esfuerzo superior debido al esfuerzo de contacto del cabezal y el espécimen. Es por esta razón, que se considera para el

análisis, la verificación de los valores de esfuerzo en la superficie inferior. En la figura 5.2 se observa el comportamiento del esfuerzo normal en la superficie inferior.

Figura 5. 2 Esfuerzo normal presente en la superficie inferior del perfil estructural 40x40 CI12



Se puede ver claramente que el esfuerzo máximo se encuentra en el centro de la cara inferior del espécimen, lo cual es conforme a los conceptos teóricos estudiados en resistencia de materiales. El esfuerzo equivalente máximo calculado es de 595,72 MPa.

Durante el ensayo virtual del espécimen, se puede comprobar que a medida que el cabezal avanzaba, el esfuerzo normal fue incrementando su valor de forma paulatina; sin embargo, durante el descenso del cabezal se presenta un valor máximo de 595,72 MPa y posteriormente, se presenta un decremento considerable de su valor nominal, eso se debe principalmente a que el comportamiento del esfuerzo ha superado la zona plástica y este entra en la zona de post colapso, donde el perfil estructural presenta una menor oposición a ser flectado.

Los valores de esfuerzo máximo y esfuerzo mínimo se pueden apreciar con mayor claridad en la tabla #5.1.

Tabla # 5. 1 Resultados del esfuerzo normal en la cara Inferior del perfil estructural 40x40

CL12

Normal Stress Cara Inferior	
Posición Cabezal (mm)	Maximun (Mpa)
-0,14	21,79
-0,28	43,55
-0,49	76,18
-0,80	125,22
-1,27	199,20
-1,96	308,55
-2,98	355,92
-4,53	410,96
-6,65	477,61
-9,61	536,04
-11,75	568,16
-13,91	584,74
-17,05	592,62
-20,26	593,97
-23,54	595,72
-26,86	593,57
-30,25	590,10
-33,69	587,07
-37,24	587,39
-40,79	590,82
-44,25	593,27
-45,96	592,84
-47,64	592,65

Continuación Tabla #5.1

-49,30	591,13
-51,73	589,55
-54,08	586,49
-56,94	582,88
-59,58	582,19
-61,88	582,62
-63,11	583,59
-63,11	583,58
-63,11	583,58

5.3 FUERZA DEL CABEZAL

Este ensayo consiste en ubicar el espécimen a analizar en dos apoyos configurados simétricamente, respecto a la longitud del perfil y con un tercer cabezal aplicar una fuerza en el centro del espécimen para flectarlo.

En la figura 5.1 se observa que el cabezal se desplaza a lo largo del eje Y generando la flexión en el perfil estructural; mientras que el eje (X) corresponde a la dimensión longitudinal del espécimen analizado.

En la tabla #5.2 se muestra los valores de fuerza requeridos por el cabezal, para lograr el desplazamiento del espécimen.

Tabla # 5. 2 Resultados de la fuerza ejercida por el cabezal

Joint Probe				
Posición Cabezal (mm)	X (N)	Y (N)	Z (N)	Total (N)
-0,14	-1,49	-790,10	0,00	790,10
-0,28	-5,90	-1578,20	0,00	1578,20

Continuación Tabla #5.2

-0,49	-17,96	-2756,60	0,00	2756,70
-0,80	-48,19	-4535,10	0,00	4535,40
-1,27	-117,17	-7259,20	0,00	7260,10
-1,96	-39,92	-11010,00	0,01	11010,00
-2,98	54,43	-14219,00	0,13	14219,00
-4,53	0,51	-16402,00	0,03	16402,00
-6,65	-0,12	-17991,00	0,07	17991,00
-9,61	-121,06	-18843,00	-0,06	18843,00
-11,75	103,05	-18968,00	0,47	18968,00
-13,91	-315,55	-18676,00	-0,04	18679,00
-17,05	-629,10	-17923,00	-0,26	17934,00
-20,26	-1856,10	-17230,00	-0,61	17329,00
-23,54	-4015,70	-16618,00	0,59	17096,00
-26,86	-6649,30	-16272,00	0,52	17579,00
-30,25	-8048,70	-15966,00	-0,58	17880,00
-33,69	-7448,00	-15231,00	-0,09	16954,00
-37,24	-4938,90	-14194,00	-0,04	15029,00
-40,79	-2950,90	-13348,00	-0,04	13670,00
-44,25	-1208,40	-12538,00	-0,04	12596,00
-45,96	-315,33	-11976,00	-0,04	11980,00
-47,64	484,08	-11643,00	-0,04	11653,00
-49,30	1231,10	-11008,00	-0,04	11077,00
-51,73	2234,60	-10516,00	-0,04	10751,00
-54,08	3336,80	-9923,80	-0,04	10470,00
-56,94	4887,80	-8820,80	-0,04	10085,00
-59,58	6644,10	-7766,70	-0,04	10221,00
-61,88	8847,10	-6430,10	-0,04	10937,00
-63,11	9460,60	-5930,80	-0,04	11166,00

Continuación Tabla #5.2

-63,11	9459,90	-5930,80	-0,04	11165,00
-63,11	9459,90	-5930,80	-0,04	11165,00
-63,11	9459,90	-5930,80	-0,04	11165,00
-63,11	9459,90	-5930,80	-0,04	11165,00

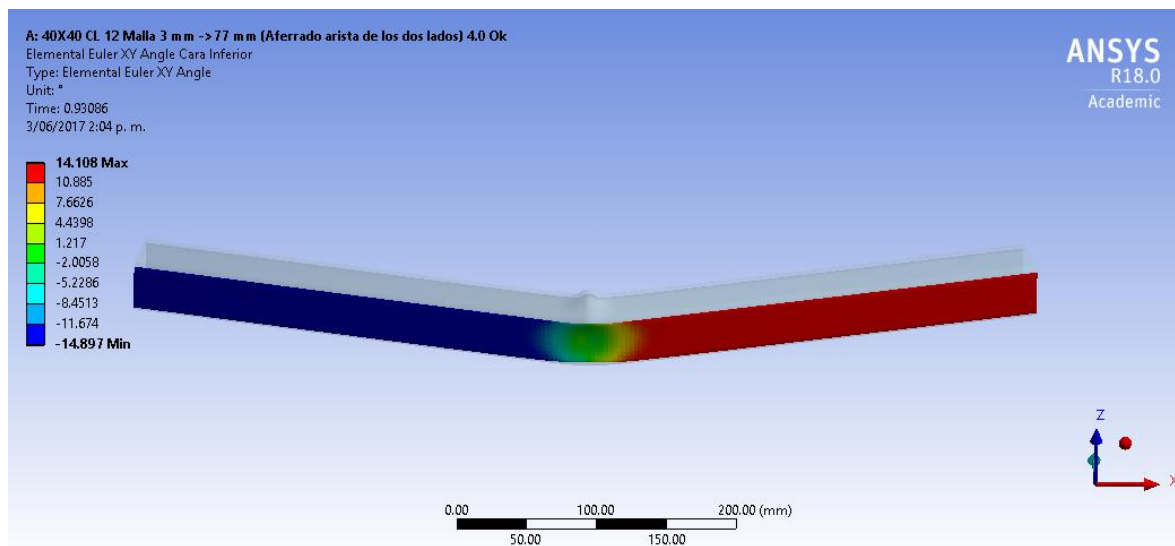
En la anterior tabla se ve claramente como el valor de la fuerza requerida por el cabezal a lo largo del eje *Y* llega hasta un valor máximo de -18968 [N] siendo negativo por la dirección del desplazamiento; Una vez alcanzado este punto, la fuerza aplicada presenta un decremento considerable de su valor máximo, eso se debe principalmente a que el espécimen ha alcanzado su límite máximo de resistencia superando la zona elástica y la zona plástica, presentando un comportamiento de post colapso, donde la fuerza necesaria para generar mayores desplazamientos y flectar el espécimen, es menor.

5.4 ANGULO DE DEFORMACIÓN Y DEFORMACIÓN DIRECCIONAL

Uno de los parámetros de interés en esta prueba es que tanta deformación angular podrá alcanzar el espécimen al momento del colapso. Una vez el perfil estructural entra en la zona de post colapso la deformación angular es mayor, debido a que el espécimen presenta grandes desplazamientos, con una menor fuerza aplicada por el cabezal.

Tanto el ángulo como la deformación direccional son parámetros que están directamente relacionados. En la figura 5.3, se puede ver como es la deformación angular de la probeta al final de la prueba, alcanzando un ángulo de deformación entre 3,4° instante en el cual la resistencia a deformarse que presenta el espécimen disminuye considerablemente debido al colapso, llegando hasta un ángulo de deformación final de 14,67°.

Figura 5. 3 Ángulo de deformación generado en la superficie inferior del perfil estructural 40x40 CL12



En la tabla #5.3 se observan los valores correspondientes a la deformación angular alcanzada durante el ensayo, con un valor máximo de 14,67 ° con una deformación direccional de la superficie inferior del espécimen máximo de -63,11 mm.

Tabla # 5. 3 Resultados del ángulo de deformación y la deformación direccional de la cara inferior del perfil estructural 40x40 CL12

Elemental Euler XY Angle Cara Inferior		Directional Deformation Cara Inferior	
Posición Cabezal (mm)	Maximun(°)	Minimun (mm)	Maximun (mm)
-0,14	0,06	-0,14	0,05
-0,28	0,12	-0,28	0,09
-0,49	0,20	-0,49	0,16
-0,80	0,33	-0,80	0,26

Continuación Tabla #5.3

-1,27	0,50	-1,27	0,42
-1,96	0,78	-1,96	0,66
-2,98	1,13	-2,98	1,01
-4,53	1,58	-4,53	1,53
-6,65	2,16	-6,65	2,23
-9,61	2,90	-9,61	3,15
-11,75	3,41	-11,75	3,81
-13,91	3,92	-13,91	4,47
-17,05	4,66	-17,05	5,42
-20,26	5,42	-20,26	6,38
-23,54	6,18	-23,54	7,38
-26,86	6,94	-26,86	8,39
-30,25	7,79	-30,25	9,42
-33,69	8,51	-33,69	10,50
-37,24	9,32	-37,24	11,65
-40,79	10,15	-40,79	12,83
-44,25	10,86	-44,25	14,01
-45,96	11,22	-45,96	14,61
-47,64	11,61	-47,64	15,18
-49,30	11,96	-49,30	15,76
-51,73	12,44	-51,73	16,59
-54,08	12,95	-54,08	17,44
-56,94	13,49	-56,94	18,52
-59,58	14,03	-59,58	19,52
-61,88	14,43	-61,88	20,47
-63,11	14,67	-63,11	20,97
-63,11	14,67	-63,11	20,97
-63,11	14,67	-63,11	20,97

Continuación Tabla #5.3

-63,11	14,67	-63,11	20,97
-63,11	14,67	-63,11	20,97

5.5 MOMENTO FLECTOR MÁXIMO

En esta etapa se analizarán los valores correspondientes al momento flector máximo que soporta el espécimen antes, durante y después de que el espécimen inicie el proceso de colapso. De la misma forma, se determinará la energía de deformación almacenada por el espécimen.

Utilizando los datos de la Tabla #5.2 se grafica los diagramas de momento flector y cizalladura para el espécimen 40x40 Cl 12 en la figura 5.4 y la figura 5.5 , donde se observa que el momento flector máximo está presente en el centro longitudinal del espécimen.

Figura 5. 4 Solicitación de carga del perfil estructural 40x40 Cl 12

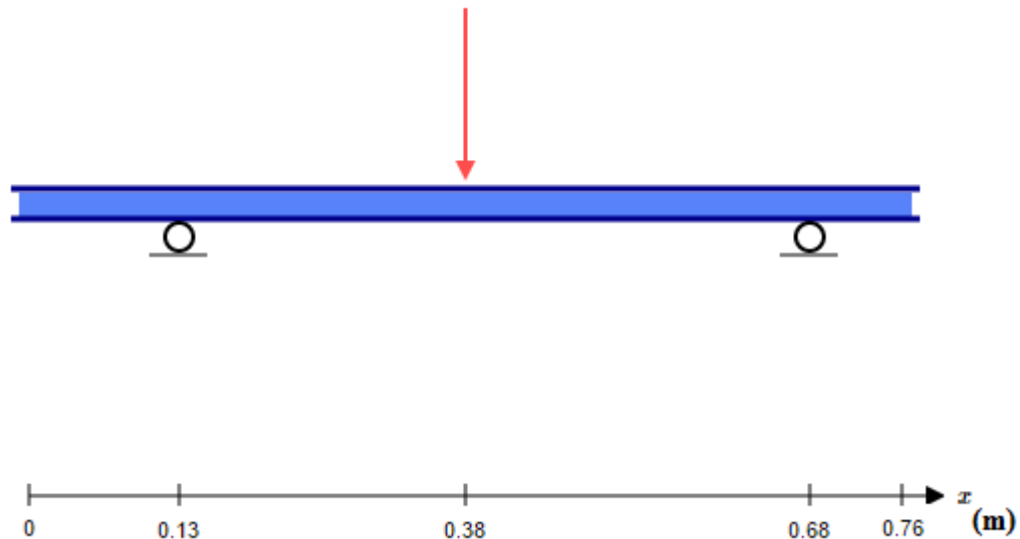


Figura 5.5 Diagrama de cizalladura para el perfil estructural 40x40 Cl 12

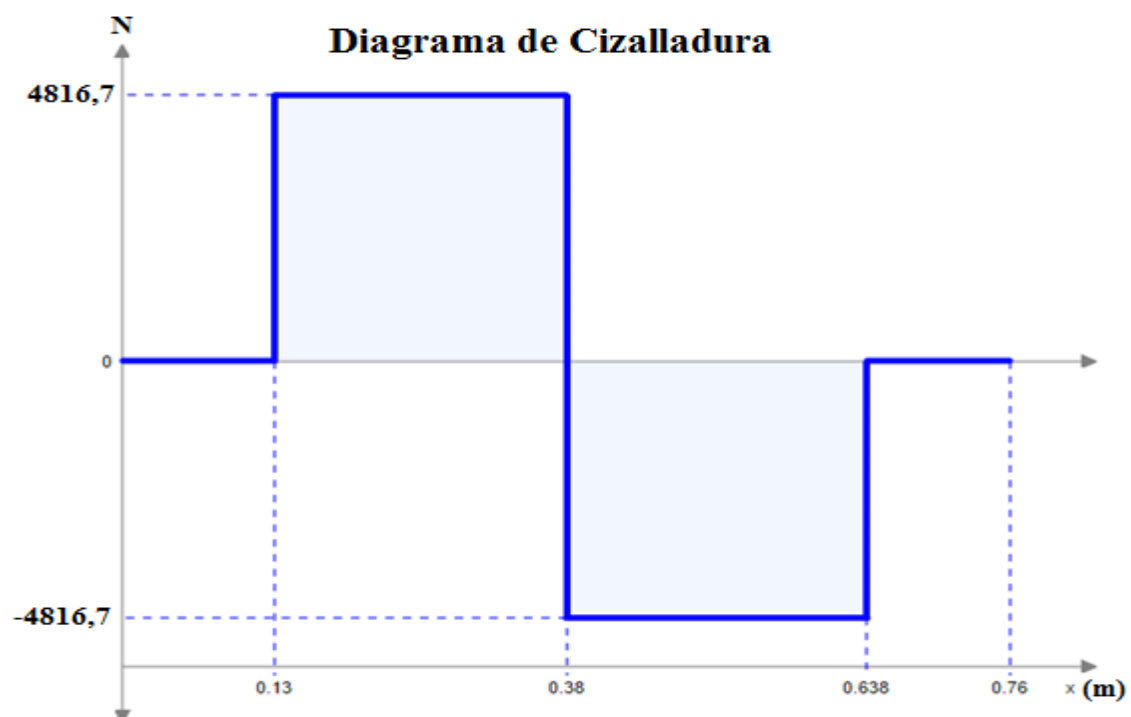
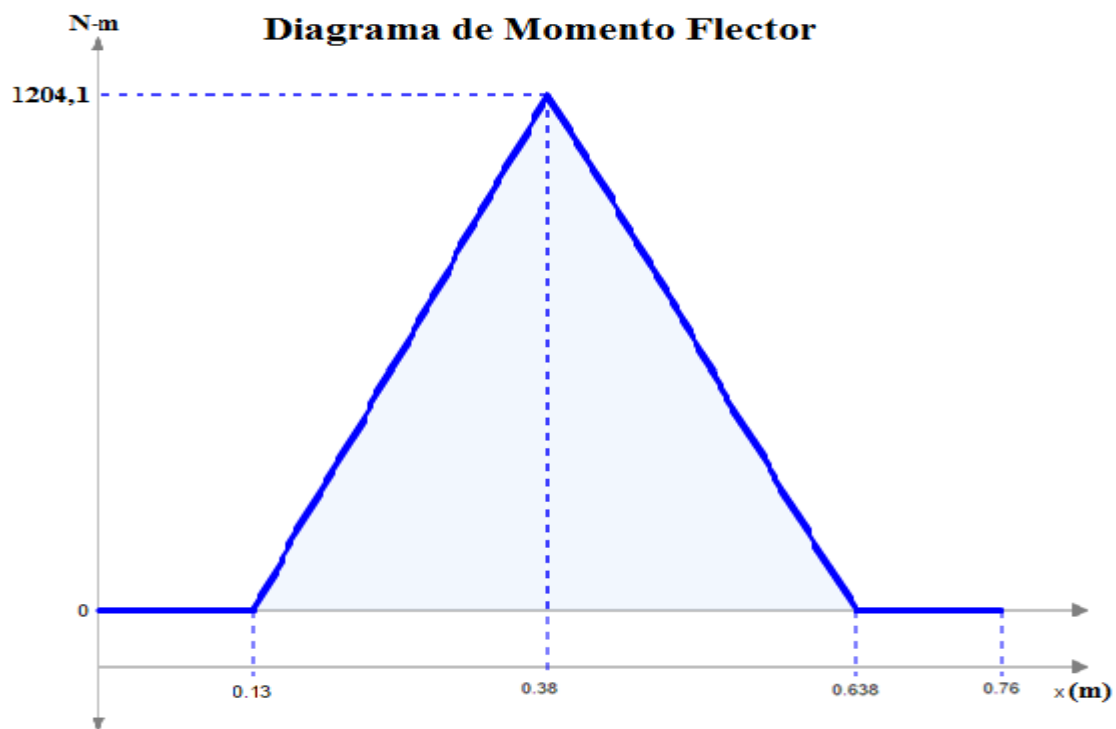


Figura 5. 6 Diagrama de momento flector para el perfil estructural 40x40 Cl 12



Aplicando dichos principios básicos se determinó la fórmula que rige los diferentes valores de Momento flector máximo que se presentara en el espécimen a lo largo del tiempo que dure la prueba; La fórmula es la siguiente.

$$\mathbf{M_{max} = 0,5 * F * \frac{L}{2}} \quad \text{Ecuación 5.1 [4]}$$

Donde:

M_{\max} =Momento flector máximo presente en el centro del espécimen en N-m

F =Valor de la carga ejercida por el cabezal en Newton N

L = longitud entre apoyo y apoyo del espécimen equivalente a 260 mm

Los diferentes valores de momento flector máximo, así como su correspondiente ángulo de deflexión obtenidos durante la prueba se pueden apreciar en la tabla 5.4, donde se relaciona la fuerza requerida en el cabezal, así como las reacciones de los apoyos y la deformación angular presente en ellos.

Tabla # 5. 4 Resultados del cálculo de reacciones y Momento flector presentes en el perfil estructural 40x40 CL12

Posición Cabezal (mm)	Carga [N]	Mmax [N- m]	Angulo Max Simulado [°]
-0,14	-790,10	51,36	0,06
-0,28	-1578,20	102,58	0,12
-0,49	-2756,60	179,18	0,20
-0,80	-4535,10	294,78	0,33
-1,27	-7259,20	471,85	0,50
-1,96	-11010,00	715,65	0,78
-2,98	-14219,00	924,24	1,13
-4,53	-16402,00	1066,13	1,58
-6,65	-17991,00	1169,42	2,16
-9,61	-18843,00	1224,80	2,90

Continuación Tabla #5.4

-11,75	-18968,00	1232,92	3,41
-13,91	-18676,00	1213,94	3,92
-17,05	-17923,00	1165,00	4,66
-20,26	-17230,00	1119,95	5,42
-23,54	-16618,00	1080,17	6,18
-26,86	-16272,00	1057,68	6,94
-30,25	-15966,00	1037,79	7,79
-33,69	-15231,00	990,02	8,51
-37,24	-14194,00	922,61	9,32
-40,79	-13348,00	867,62	10,15
-44,25	-12538,00	814,97	10,86
-45,96	-11976,00	778,44	11,22
-47,64	-11643,00	756,80	11,61
-49,30	-11008,00	715,52	11,96
-51,73	-10516,00	683,54	12,44
-54,08	-9923,80	645,05	12,95
-56,94	-8820,80	573,35	13,49
-59,58	-7766,70	504,84	14,03
-61,88	-6430,10	417,96	14,43
-63,11	-5930,80	385,50	14,67
-63,11	-5930,80	385,50	14,67
-63,11	-5930,80	385,50	14,67
-63,11	-5930,80	385,50	14,67
-63,11	-5930,80	385,50	14,67

De las tablas anteriores se puede notar que el valor correspondiente a el Momento flector máximo (1232,92 [N-m]) alcanzado durante la prueba, corresponde al valor de carga máxima ejercida por el cabezal -18968 N, con un ángulo de deformación de 3,41 °.

Al momento de tabular los resultados de (Momento flector máximo-Deformación angular Simulada) y (Momento flector máximo-Deformación angular Teórica) se obtiene la gráfica mostrada en la figura 5.4 , donde se puede apreciar con mayor claridad el límite máximo de resistencia a la flexión respecto a la deformación angular, que puede soportar el perfil durante la simulación.

Adicionalmente, se grafica la expresión teórica para la determinación de la deformación angular en una viga simplemente apoyada con carga puntual central, usando la ecuación 5.2.

$$\Phi = \frac{P*L}{16*E*I} \quad \text{Ecuación 5.2 [4]}$$

Donde:

Φ = Deformación Angular [rad]

P = Carga aplicada [N]

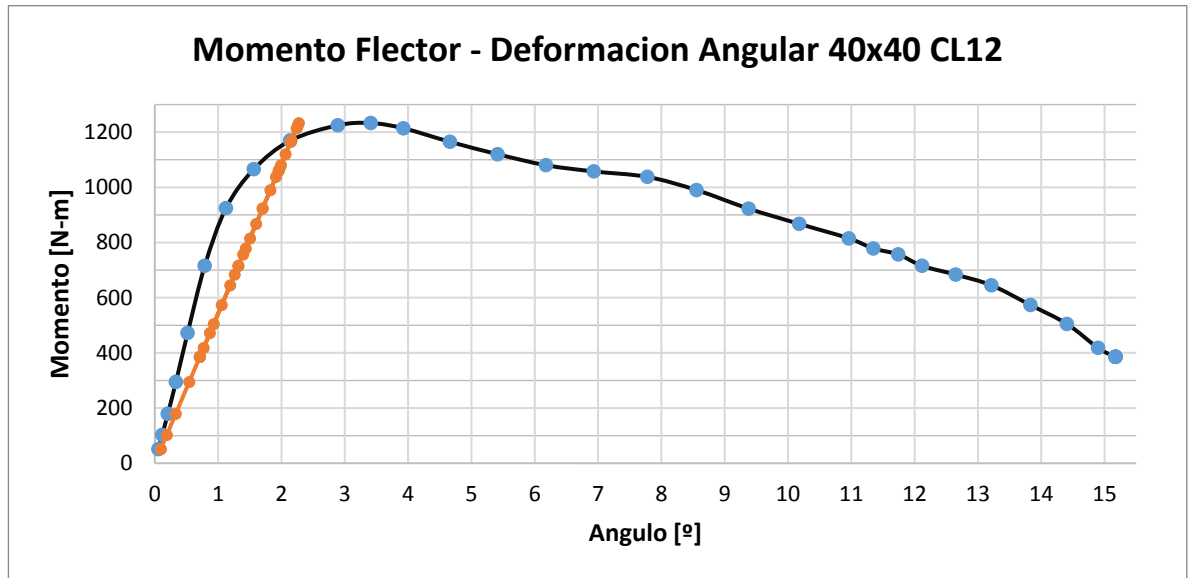
L = Longitud del perfil estructural [m] (760mm)

E = Modulo de Young [kg/m²]

I = Momento de Inercia [m⁴]

La ecuación 5.2 aplica únicamente para la zona elástica y para ángulos de deformación menores a 10°.

Figura 5. 7 Momento flector vs Deformación angular perfil estructural 40X40 CL12



La curva (Momento flector máximo-Deformación angular Simulada) mostrada en color negro en la figura 5.4 , presenta inicialmente un comportamiento lineal hasta alcanzar 924,24 N-m con un ángulo de deformación de 1,12° ,antes de alcanzar este punto el comportamiento del espécimen aún se encuentra en la zona elástica; posteriormente su conducta es no lineal hasta alcanzar a un tope máximo de 1232,92 N-m con un ángulo de deformación de 3,41° , a partir de este momento el curva presenta una pendiente negativa allí el espécimen entra en la zona de post colapso donde el cabezal necesita aplicar una fuerza menor al valor máximo de 18968 N, para generar una deformación angular mayor.

Se observa también que la deformación angular teórica difiere del comportamiento obtenido en la simulación; Además existe un punto en que las dos curvas se cruzan (1150 N-m y 2,1°), con este Momento Flector el perfil ha alcanzado un valor de esfuerzo cercano al punto de fluencia del material.

Otro aspecto de gran importancia a analizar es la Densidad de energía de deformación total (J/m^3) que puede almacenar el perfil estructural antes de colapsar debido a la sollicitación de carga aplicada. La energía se calcula a partir del área bajo la curva de momento flector - deformación angular simulado. Estos resultados se pueden ver en la tabla # 5.5.

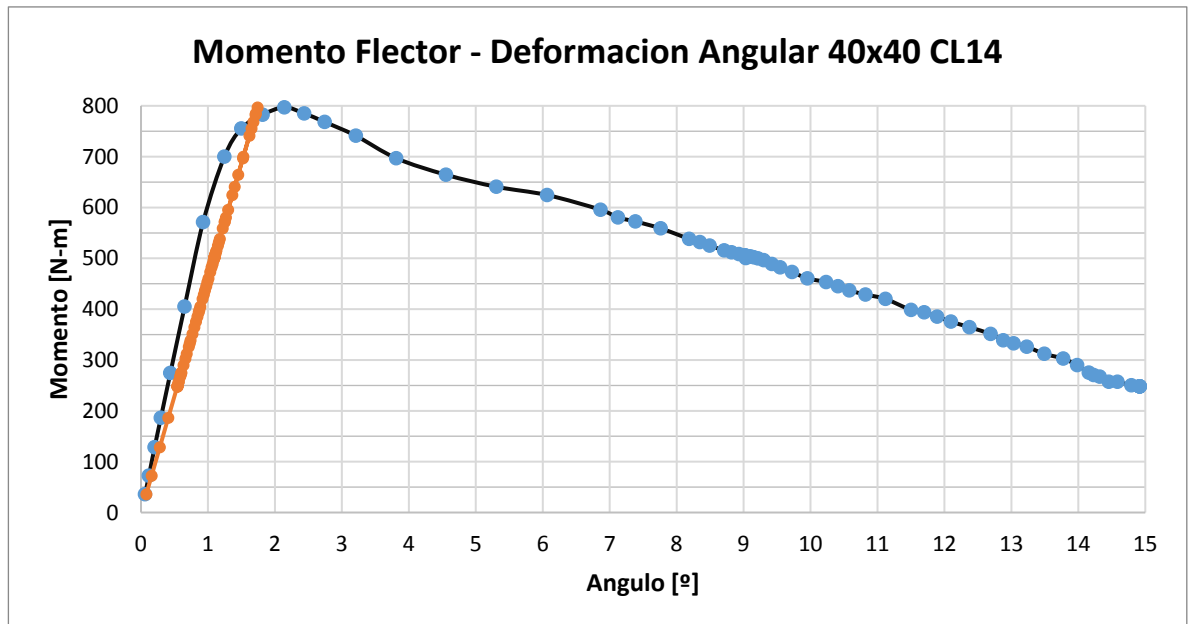
Tabla # 5. 5 Densidad de energía de deformación perfil estructural 40x40 CL12

Zona	Densidad de Energía de deformación [J/m³]
Elástica	55,66
Plástica	186,44
Energía Total	242,10

La energía de deformación total para el perfil estructural 40x40 CL12, teniendo en cuenta su densidad es de $6,97 \times 10^{-2}$ [J].

En la figura 5,7 se observa el valor correspondiente a el momento flector máximo (796,97 [N-m]) alcanzado durante la prueba, correspondiente a el valor de carga máxima ejercida por el cabezal (-12261 [N]), con un ángulo de deformación de (2,14 [°]).

Figura 5. 8 Momento flector vs Deformación angular perfil estructural 40X40 CL14



La deformación angular teórica difiere del comportamiento obtenido en la simulación; Además existe un punto en que las dos curvas se cruzan (750 [N-m] y 1,6°), con este valor de Momento flector el perfil ha alcanzado un valor de esfuerzo cercano al punto de fluencia del material, momento a partir del cual el material entra en la “Zona plástica”.

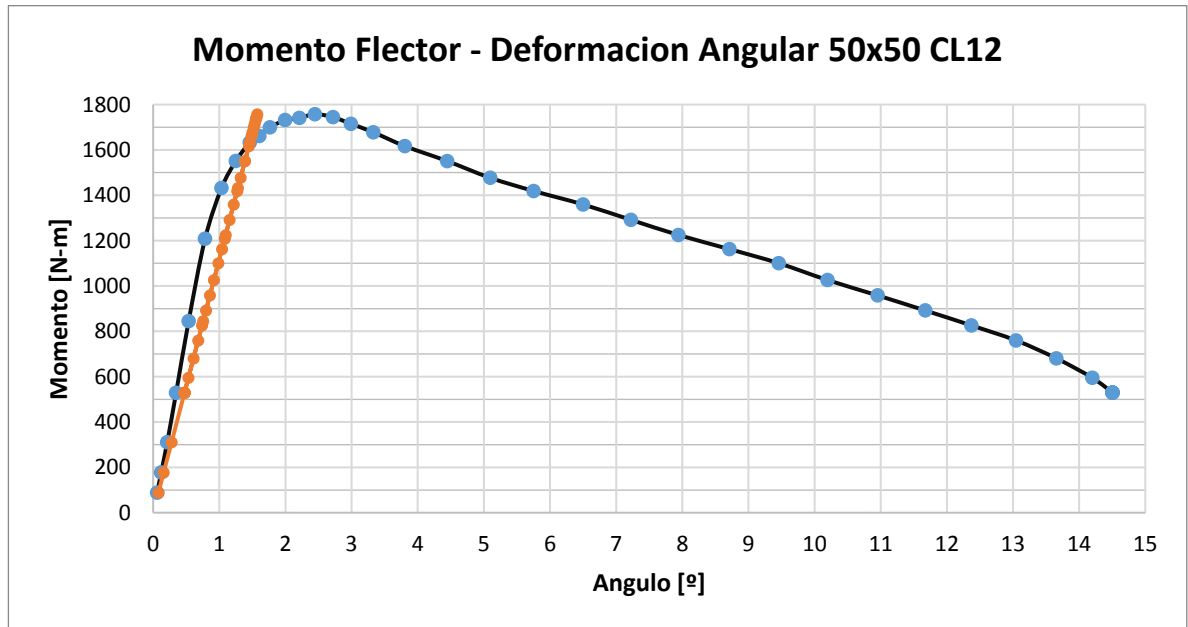
La energía de deformación total para el perfil estructural 40x40 CL14, teniendo en cuenta su densidad es de $2,90 \times 10^{-2}$ [J]. En la tabla #5.6 se tienen los resultados de energía absorbida en cada zona para este espécimen.

Tabla # 5. 6 Densidad de energía de deformación perfil estructural 40x40 CL14

Zona	Densidad de Energía de deformación [J/m³]
Elástica	20,19
Plástica	115,73
Energía Total	135,92

En la figura 5,8 se observa el valor correspondiente a el Momento flector máximo (1757,41 [N-m]) alcanzado durante la prueba, correspondiente a el valor de carga máxima ejercida por el cabezal (-27037 [N]), con un ángulo de deformación de (2,45 [°]).

Figura 5. 9 Momento flector vs Deformación angular perfil estructural 50X50 CL12



La deformación angular teórica difiere un poco al comportamiento obtenido en la simulación; Además existe un punto en que las dos curvas se cruzan (1600 [N-m] y 1,5°), con este Momento flector el perfil ha alcanzado un valor de esfuerzo cercano al punto de fluencia del material, momento en el cual el material entra en la “Zona plástica”.

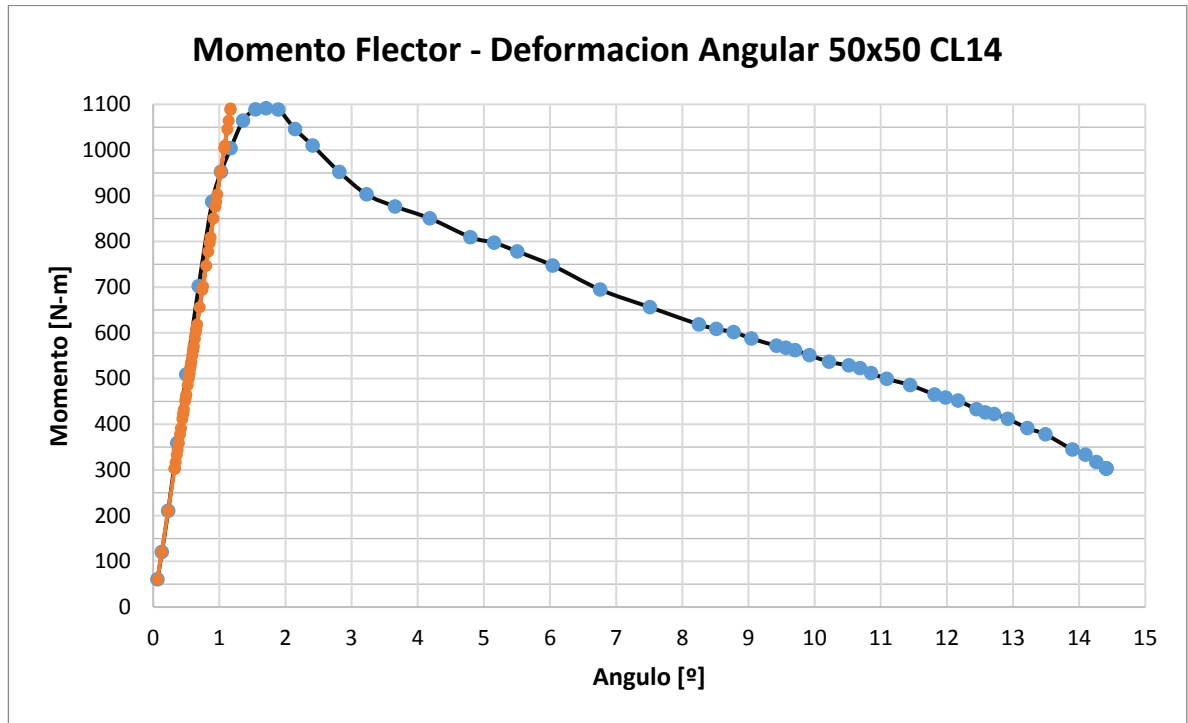
La energía de deformación total para el perfil estructural 50x50 CL12, teniendo en cuenta su densidad es de $1,12 \times 10^{-1}$ [J]. En la tabla #5.7 se tienen los resultados de energía absorbida en cada zona para este espécimen.

Tabla # 5. 7 Densidad de energía de deformación perfil estructural 50x50 CL12

Zona	Densidad de Energía de deformación [J/m ³]
Elástica	55,03
Plástica	248,13
Energía Total	303,16

En la figura 5,9 se observa el valor correspondiente a el Momento flector máximo (1091,29 [N-m]) alcanzado durante la prueba, correspondiente a el valor de carga máxima ejercida por el cabezal (-16789 [N]), con un ángulo de deformación de (1,71 [°]).

Figura 5. 10 Momento flector vs Deformación angular perfil estructural 50X50 CL14



Se observa también que la deformación angular teórica no difiere del comportamiento obtenido en la simulación, en lo correspondiente a la zona elástica; Además existe un punto en que las dos curvas se desprenden (1000 [N-m] y 1,2°), con este valor de Momento Flector el perfil ha alcanzado un valor de Esfuerzo Normal cercano al punto de fluencia del material.

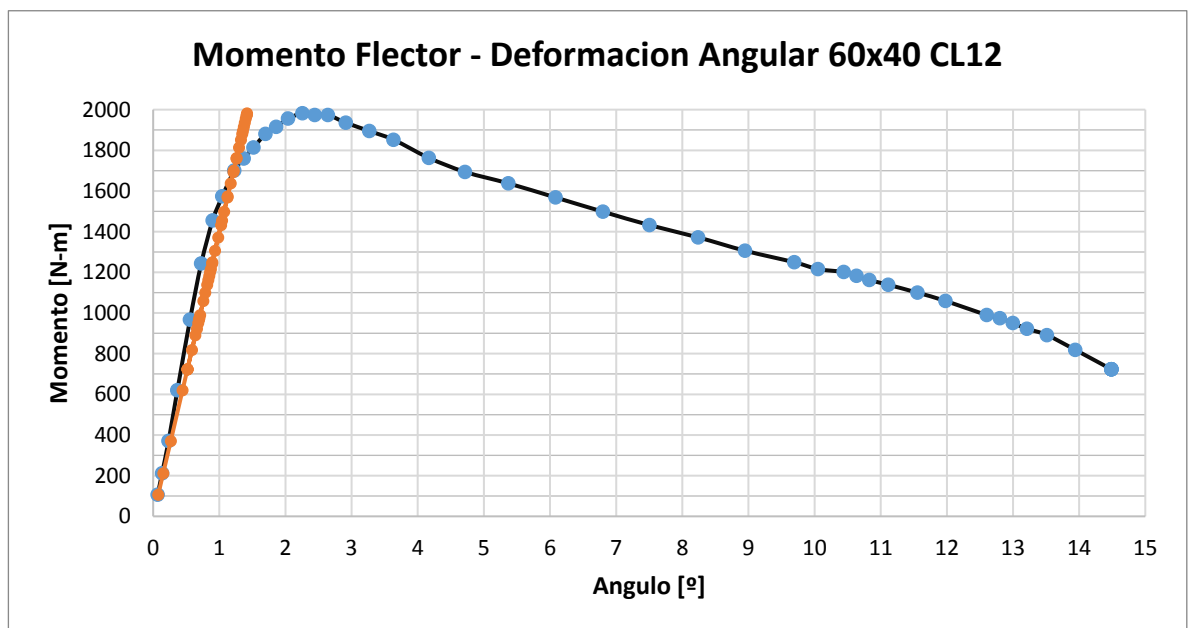
La energía de deformación total para el perfil estructural 50x50 CL14, teniendo en cuenta su densidad es de $4,51 \times 10^{-2}$ [J]. En la tabla #5.8 se tienen los resultados de energía absorbida en cada zona para este espécimen.

Tabla # 5. 8 Densidad de energía de deformación perfil estructural 50x50 CL14

Zona	Densidad de Energía de deformación [J/m³]
Elástica	21,55
Plástica	145,02

En la figura 5,10 se observa el valor correspondiente a el Momento flector máximo (1982,18 [N-m]) alcanzado durante la prueba, correspondiente a el valor de carga máxima ejercida por el cabezal (-30495 [N]), con un ángulo de deformación de (2,26 [°]).

Figura 5. 11 Momento flector vs Deformación angular perfil estructural 60X40 CL12



Se aprecia también que la deformación angular teórica no difiere del comportamiento obtenido en la simulación, en lo correspondiente a la zona elástica; Además existe un punto en que las dos curvas se desprenden (1700 [N-m] y 1,3°), con este valor de Momento Flector el perfil ha alcanzado un valor de Esfuerzo Normal cercano al punto de fluencia del material, momento en el cual el comportamiento del material entra en la “Zona plástica”.

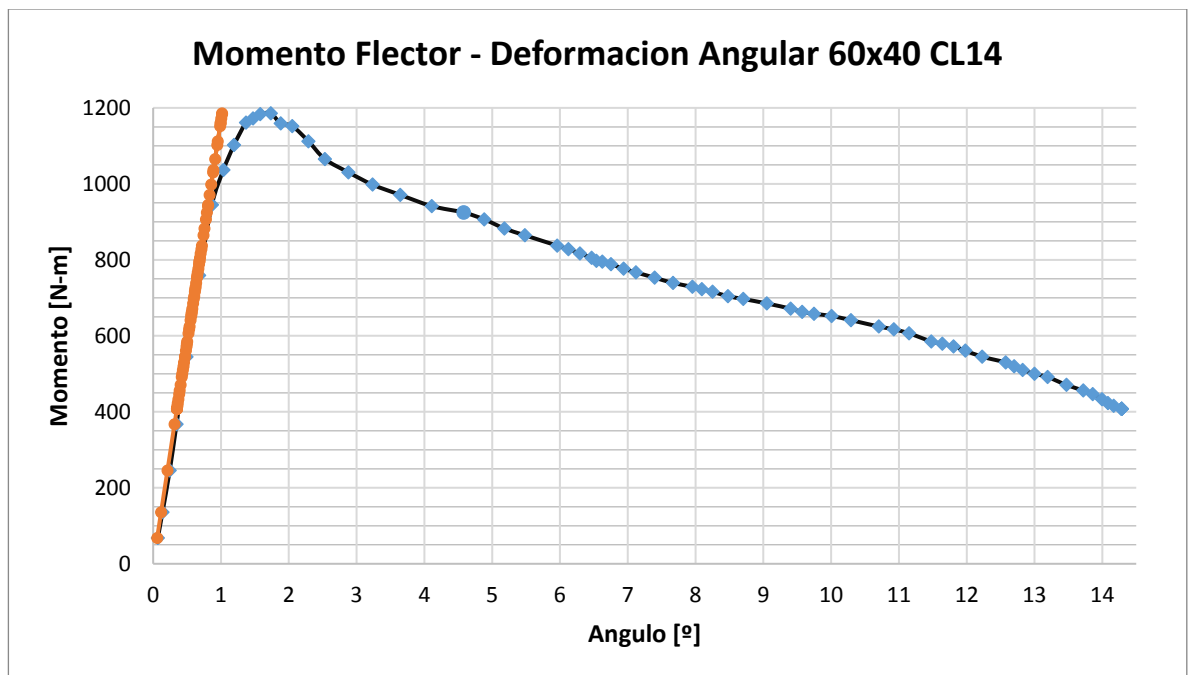
La energía de deformación total para el perfil estructural 60x40 CL12, teniendo en cuenta su densidad es de $1,28 \times 10^{-1}$ [J]. En la tabla #5.9 se tienen los resultados de energía absorbida en cada zona para este espécimen.

Tabla # 5. 9 Densidad de energía de deformación perfil estructural 60x40 CL12

Zona	Densidad de Energía de deformación [J/m³]
Elástica	54,63
Plástica	293,23
Energía Total	347,86

En la figura 5,11 se observa el valor correspondiente a el Momento flector máximo (1185.47 [N-m]) alcanzado durante la prueba, correspondiente a el valor de carga máxima ejercida por el cabezal (-18238 [N]), con un ángulo de deformación de (1.73 [°]).

Figura 5. 12 Momento flector - Deformación angular perfil estructural 60X40 CL14



Se aprecia que la deformación angular teórica no difiere del comportamiento obtenido en la simulación, en lo correspondiente a la zona elástica; Además que existe un punto en que las dos curvas se desprenden (950 [N-m] y 1°), en este valor de Momento Flector el perfil ha alcanzado un valor de Esfuerzo Normal cercano al punto de fluencia del material, momento en el cual el comportamiento del material entra en la “Zona plástica”.

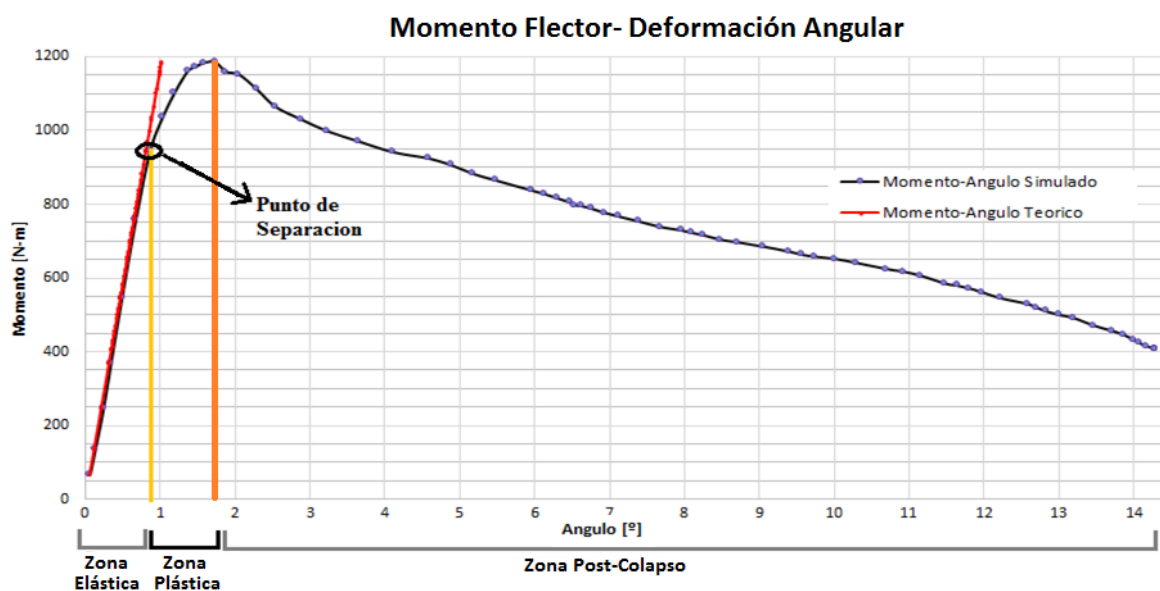
La energía de deformación total para el perfil estructural 60x40 CL14, teniendo en cuenta su densidad es de $5,10 \times 10^{-2}$ [J]. En la tabla #5.10 se tienen los resultados de energía absorbida en cada zona para este espécimen.

Tabla # 5. 10 Densidad de energía de deformación perfil estructural 60x40 CL14

Zona	Densidad de Energía de deformación [J/m³]
Elástica	24,00
Plástica	164,45
Energía Total	188,45

Se concluye que de forma general que el comportamiento de las curvas de Momento Flector contra Deformación Angular Simulada y Teórica, presentan una tendencia casi lineal y similar hasta que llegan el punto de fluencia propio del material, de ahí en adelante su comportamiento difiere ya que entra a regir la denominada Zona plástica, zona en la cual la ecuación 5.2 anteriormente utilizada no aplica, alcanzando un límite máximo de resistencia partir del cual la pendiente de la gráfica es negativa decreciendo paulatinamente, allí el espécimen entra en la zona de post colapso donde el cabezal necesita aplicar una fuerza menor al valor máximo ,para generar una deformación angular mayor. En la figura 5.12 se observan las tres diferentes zonas la elástica, la plástica y de post colapso que describen el comportamiento del espécimen durante la simulación del ensayo de flexión.

Figura 5. 13 Momento flector vs Deformación angular simulada y teórica



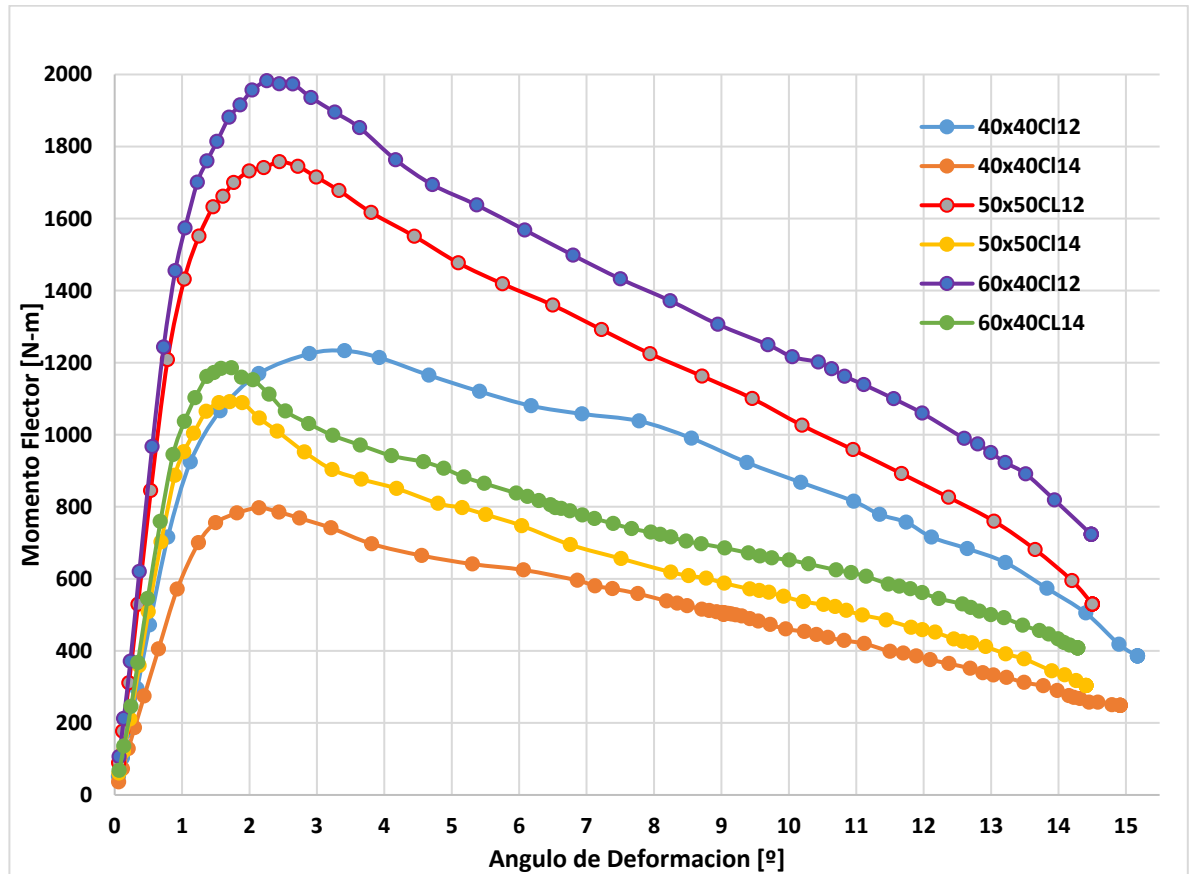
A continuación se presenta la tabla con el resumen de los diferentes resultados de interés obtenidos de las seis simulaciones realizadas a los diferentes perfiles estructurales, tales como energía absorbida, momento flector máximo, fuerza máxima del cabezal y ángulo a momento flector.

Tabla # 5. 11 Resumen de resultados

Perfil Estructural	Densidad de Energía de deformación [J/m ³]	Volumen [mm ³]	Peso [kg]	Energía Absorbida [J]	Momento flector máximo [N-m]	Fuerza máxima del cabezal [N]	Angulo a Momento flector Max [°]
40x40 CL12	242.10	288030	2.26	6.97.E-02	1232.92	-18968	3.41
40x40 CL14	135.92	213000	1.67	2.90.E-02	796.97	-12261	2.14
50x50 CL12	303.15	368960	2.90	1.12.E-01	1757.41	-27037	2.45
50x50 CL14	166.56	270760	2.13	4.51.E-02	1091.29	-16789	1.71
60x40 CL12	347.86	368960	2.90	1.28.E-01	1982.18	-30495	2.26
60x40 CL14	188.45	270760	2.13	5.10.E-02	1185.47	-18238	1.73

En la figura 5.11 se compara el comportamiento del Momento Flector vs Deformación Angular Simulada, de los seis diferentes perfiles estructurales.

Figura 5. 14 Momento deflector vs Deformación angular de todos los perfil estructurales

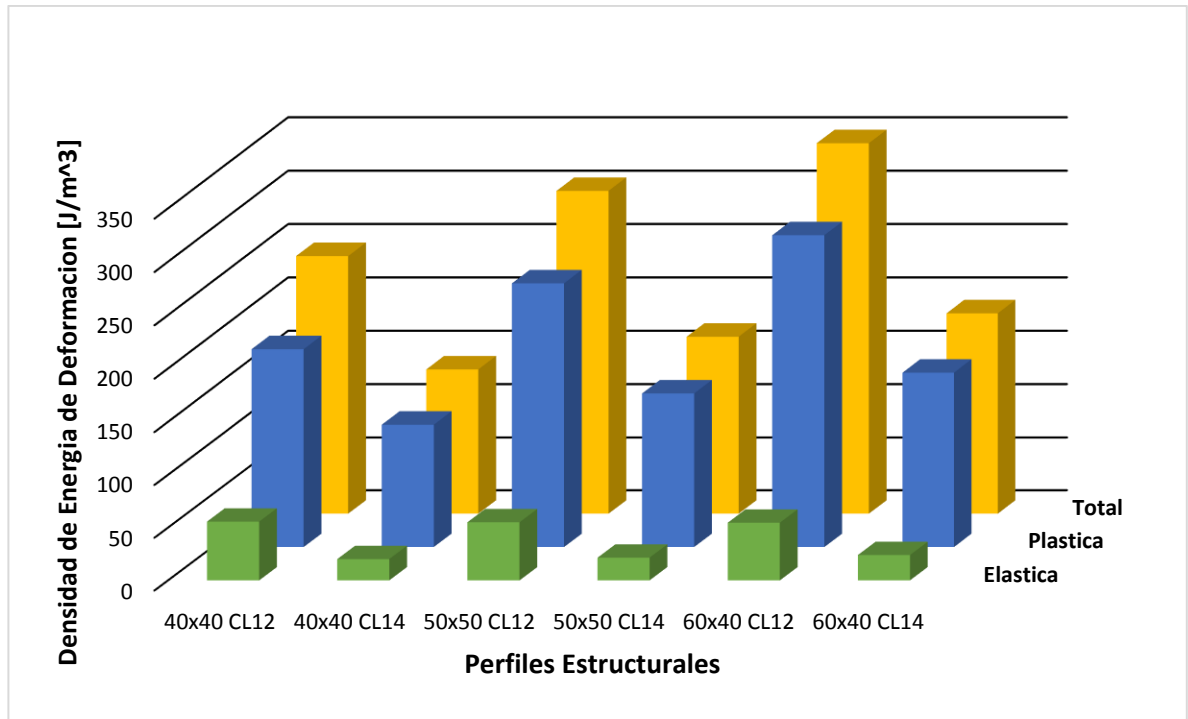


Se concluye que el perfil estructural que está en capacidad de soportar un mayor momento flector 1982,18 N-m y con un ángulo de deformación de 2,26 °) antes de empezar a ceder o convertirse en una bisagra plástica es el 60x40Cl12; este perfil por lo tanto puede absorber mayor cantidad de energía antes de romperse. Estos resultados corresponden a un valor de carga máxima requerida por el cabezal de (-30495 [N]).

En la figura 5.12 se observa en color verde los valores correspondientes a la densidad de energía de deformación, que puede absorber cada perfil estructural, cuando aún están en zona elástica; en color azul los valores de densidad de energía de deformación, que

pueden absorber cuando están aún en zona plástica y en color amarillo el total de densidad de energía de deformación total que cada perfil estructural puede absorber.

Figura 5. 15 Densidad de energía de deformación absorbida por cada perfil estructural



Por los datos anteriormente mencionados, de la gráfica se confirma que el perfil estructural que está en capacidad de absorber más energía de deformación es el 60x40CL12.

Comparando cada familia de perfiles con igual geometría (40x40, 50x50, 60x40) en sus dos diferentes calibres, se concluye que el espesor del perfil estructural es un factor determinante en la resistencia que presenta para oponerse a la flexión y llegar al colapso.

En este caso para un mismo valor de desplazamiento del cabezal de 63,1 mm y diferentes valores de fuerza aplicada, una diferencia de **0,76 mm** de espesor de lámina entre calibre 12 y calibre 14, genera una variación en la capacidad de absorber energía de deformación, en promedio de **230[J/m³]**.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y APORTES

6.1 CONCLUSIONES

Se realizó un tratamiento analítico de los criterios y condiciones de frontera para un ensayo de flexión de tres puntos, de acuerdo con las normas ASTM D143-14, D3043 y E290-14.

Se logró definir un procedimiento para la aplicación la simulación computacional para un ensayo de flexión de tres puntos, donde se establecieron los parámetros dimensionales necesarios y se definieron las condiciones de frontera para el modelo.

Se realizó la caracterización de diferentes perfiles de sección cerrada cuadrada, de acuerdo a la disponibilidad en el sector comercial y productivo de la región.

Se logró simular los diferentes perfiles estructurales de interés, validando los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en la norma ASTM D143-14, D3043 y E290-14 (Carga máxima soportar, ángulo de deformación, momento flector máximo, esfuerzo norma máximo).

Se logró comprender y analizar el comportamiento de los esfuerzos en diferentes perfiles estructurales sometidos a flexión.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda que para cada lote de perfiles estructurales realizar un ensayo de flexión, un ensayo de tracción y analizar los datos obtenidos, ya que cada lote tiene una composición química diferente y su comportamiento a una sollicitación de carga flectora será diferente.

Se recomienda el uso del software ANSYS para modelar otros ensayos mecánicos y tener un banco de experimentos que ayuden a caracterizar el comportamiento de diferentes elementos estructurales.

Se puede obtener mejoras en el desempeño de la estructura, se recomienda disminuir el calibre en los perfiles, ya que se evidencia un aumento significativo en la capacidad de absorber energía al aumentar el espesor.

Se recomienda para simulaciones futura de ensayos mecánicos tener en cuenta los parámetros relacionados a la fricción existente entre todas las superficies y de cómo esta afecta a los resultados.

Se recomienda realizar un análisis más detallado del ensayo de flexión en tres puntos mediante el sistema de análisis explicit dimanics, para observar detalladamente el comportamiento de las grietas y fisuras generadas al momento de la falla mecánica un perfil estructural.

6.3 APORTES

Se logró el montaje virtual de un ensayo de flexión de tres puntos estandarizado según las normas ASTM D143-14, D3043 y E290-14, que servirá como prototipo virtual para futuros ensayos de flexión de tres puntos.

Se determinó la relación entre la capacidad que tiene un perfil estructural de absorber energía de deformación y su tamaño.

Gracias a resultados teóricos del diagrama Momento-Deformación se determinó la veracidad de la simulación al describir el comportamiento de los perfiles sometidos a flexión cuando aún están en “Zona Elástica”.

Se determinó la relación existente entre momento flector y ángulo de deformación, donde se encontraron tres zonas que describen el comportamiento de perfiles estructurales de sección cerrada cuadrada sometidos a flexión: la zona elástica, la zona plástica y la zona de post colapso.

6.4 REFERENCIA

- [1] Acerca de ANSYS. [Información corporativa en línea]. Versión 2017. Estados Unidos de América, s.f. [citado el 18 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<http://www.ansys.com/es-ES/About-ANSYS>>.
- [2] Acerca de ISO Tools. [Información corporativa en línea]. Versión 2017. Estados Unidos de América, s.f. [citado el 19 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<https://www.isotools.org/normas/>>.
- [3] Aceros Cortados S.A. Acero A36. [Documento PDF en línea]. Colombia, Publicado el 20 de Mayo de 2014. [Citado el 17 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<http://www.aceroscortados.com>>.
- [4] BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R y DEWOLF John T. Mecánica de Materiales. 4ª Ed. [s.l.], McGraw-Hill, 2006.
- [5] Comisión económica de las naciones unidas “Actos adoptados por órganos creados mediante acuerdos internacionales” REGLAMENTO N ° 66 para Europa (CEPE), La serie 02 de modificaciones, con fecha de entrada en vigor el 19 de agosto de 2010.
- [6] Influencia de la Calidad de malla en las Simulaciones. Uso de condiciones de contorno periódicas. [Documento PDF en línea]. 1ª Versión. Lugar de publicación desconocido. S.f. [citado el 30 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<bibing.us.es/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+Único%252F07.ANEXO+I.pdf>.
- [7] Nuestra Historia. [Información corporativa en línea]. Versión 2017.Colombia, s.f. [citado el 22 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<http://www.icontec.org/NC/QS/Paginas/nh.aspx>>.
- [8] Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure Norm ASTM D3043 [Métodos de prueba estándar para paneles estructurales en flexión Norma ASTM D3043]. [Documento PDF en línea]. 1ª Edición. Estados Unidos de América. Originally approved in 1972. Edición actual aprobada en Nov. 1, 2011. ASTM.
- [9] Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility Norm ASTM E 290/14 [Métodos de prueba estándar para la prueba de flexión de material para la ductilidad

Norma ASTM E 290-14]. [Documento PDF en línea]. 1ª Edición. Estados Unidos de América. Originally approved in 1966. Edición actual aprobada en May. 1, 2014. ASTM.

[10] Tubería Estructural. [Información página Web en línea]. Versión 2017. Colombia, s.f. [citado el 26 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<http://www.acerosmapa.com.co/index.php/productos/tuberias/tuberia-estructural>>.

[11] Universidad Tecnológica de Pereira. Ensayo de tracción y Compresión Acero A36 Informe de laboratorio. Colombia: Laboratorio de Resistencia de Materiales UTP. Ingeniera Luz Adriana Mejía, 2017.

[12] ¿What is ASTM? [¿Qué es ASTM?] [Información corporativa en línea]. Versión 2016.Estados Unidos de América, s.f. [citado el 15 marzo de 2017]. Disponible en Internet:<<https://www.astm.org/ABOUT/factsheet.html>>.